

**LORENA STOLLE**

**SIMULAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL  
EM RELAÇÃO ÀS ATIVIDADES FLORESTAIS**

**CURITIBA**

**2008**

**LORENA STOLLE**

**SIMULAÇÃO E ESPACIALIZAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL  
EM RELAÇÃO ÀS ATIVIDADES FLORESTAIS**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal - Área Manejo Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.**

**Orientadora:**

**Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Christel Lingnau**

**Co-orientadores:**

**Prof. Dr. Julio Eduardo Arce**

**Dr. Itamar Antonio Bognola**

**CURITIBA**

**2008**

*Aos meus pais:*

*Marco e Raquel*

*Ao meu irmão:*

*Tiago*

*Às minhas queridas avós:*

*Dirce e Hilda*

*E ao meu amor*

*Alexandre*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a todos os espíritos de luz, os quais me deram todo o suporte para nunca desistir.

Ao CNPq que me forneceu suporte financeiro no decorrer destes dois anos de estudo.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Christel Lingnau pela orientação e valiosas sugestões de aprimoramento deste trabalho, além da amizade e boa vontade demonstrada em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Julio Eduardo Arce pela atenção, discussões e sugestões sempre bem vindas.

Ao amigo e co-orientador Itamar Antonio Bognola, pelos ensinamentos compartilhados, pelas sugestões e boa vontade em ajudar em todas as horas, sem a sua ajuda teria sido muito mais difícil.

Ao Prof. Dr. Paulo Justiniano Ribeiro Junior pelo auxílio no entendimento da geoestatística, sugestões e discussões de relevante importância para o desenvolvimento deste trabalho.

À Battistella Florestal, que disponibilizou a área para a realização deste trabalho e forneceu todo o apoio necessário para a realização do mesmo. Em especial ao Sr. Ulisses Ribas Junior e a Eng. Florestal Helena Regina Pereira pela confiança em mim depositada e sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

Ao meu querido tio, Lauri Augusto Bahls, por todo apoio proporcionado em meus estudos de graduação, sem a sua ajuda não teria chegado até aqui.

Ao meu futuro esposo Alexandre Beutling pelo apoio, compreensão, carinho e amor inesgotáveis.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento, Lisâneas, Maísa, Matheus, Roberta, Carol, pela amizade e companheirismo demonstrados neste período.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
3.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	3
3.2 ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS .....	5
3.3 LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	6
3.4 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO PARA A ANÁLISE AMBIENTAL .....	8
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>14</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	14
4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS .....	16
4.2.1 Estado .....	17
4.2.2 Pressão.....	19
4.3 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS.....	24
4.3.1 Atributos Físicos dos Solos.....	24
4.3.2 Declividade .....	27
4.4 ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	27
4.5 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	30
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
5.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS .....	31
5.2 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS.....	31
5.2.1 Atributos Físicos dos Solos.....	31
5.2.2 Declividade .....	34
5.3 ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	36
5.3.1 Estado .....	39
5.3.2 Pressão.....	46
5.3.3 Fragilidade Ambiental em relação às atividades florestais .....	49
5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	64

<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES NUMÉRICOS POR VARIÁVEL AVALIADA.....	20
TABELA 2 - VALORES ATRIBUÍDOS ÀS ATIVIDADES FLORESTAIS ATRAVÉS DA MATRIZ DE LEOPOLD .....	21
TABELA 3 - PESOS UTILIZADOS PARA AS VARIÁVEIS DA REDE “ESTADO”.....	28
TABELA 4 - MEDIDAS QUANTITATIVAS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS....	31
TABELA 5 - ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL PARA AS VARIÁVEIS DS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO .....	33
TABELA 6 - CLASSES DE DECLIVIDADE.....	35
TABELA 7 - DOMÍNIO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FUZZY DOS DADOS ....	37
TABELA 8 - EXEMPLOS DE LOCAIS PERTENCENTES À CLASSE DE ALTA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO .....	42
TABELA 9 - EXEMPLOS DE LOCAIS PERTENCENTES À CLASSE INTERMEDIÁRIA DE FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO .....	44
TABELA 10 - EXEMPLOS DE LOCAIS PERTENCENTES À CLASSE DE BAIXA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO .....	46
TABELA 11 - VALOR “VERDADE” CORRESPONDENTE AOS VALORES DE IMPACTO DAS ATIVIDADES FLORESTAIS E DA COBERTURA FLORESTAL.....	46
TABELA 12 - VALOR “VERDADE” RESULTANTE DA REDE PRESSÃO .....	47
TABELA 13 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 4 E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL .....	51
TABELA 14 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 5, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL .....	54
TABELA 15 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 6, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL .....	56
TABELA 16 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 7, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL .....	58

TABELA 17 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 8, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL .....	58
TABELA 18 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A CLASSIFICAÇÃO DE TODOS OS CENÁRIOS .....	60
TABELA 19 - EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 8, SEM COBERTURA VEGETAL .....	62



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	14
FIGURA 2 -	MAPA COM A LOCALIZACAO NO MODELO DIGITAL DO TERRENO DOS 554 PONTOS AMOSTRAIS UTILIZADOS PARA REPRESENTAR OS ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS .....	18
FIGURA 3 -	MAPA DE USO DO SOLO UTILIZADO PARA REPRESENTAR A “PRESSÃO” .....	23
FIGURA 4 -	EXEMPLO DE UM SEMIVARIOGRAMA TÍPICO .....	25
FIGURA 5 -	GRÁFICOS <i>BOX-COX</i> PARA AS VARIÁVEIS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO .....	32
FIGURA 6 -	ESPACIALIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO OBTIDOS ATRAVÉS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA .....	34
FIGURA 7 -	MODELO DIGITAL DO TERRENO.....	35
FIGURA 8 -	MAPA DE CLASSES DE DECLIVIDADE EM GRAUS .....	36
FIGURA 9 -	ESQUEMA GRÁFICO DA REDE DE DEPENDÊNCIA ELABORADA NO PROGRAMA NETWEAVER.....	37
FIGURA 10 -	GRÁFICOS DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA FUZZY PARA CADA UMA DAS VARIÁVEIS .....	38
FIGURA 11 -	MAPA DE FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B) .....	40
FIGURA 12 -	CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A CLASSE DE ALTA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO .....	41
FIGURA 13 -	CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A CLASSE DE FRAGILIDADE INTERMEDIÁRIA PARA A REDE ESTADO.....	43
FIGURA 14 -	CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A CLASSE DE BAIXA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO .....	45

FIGURA 15 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO MANUAL E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B) .....	50
FIGURA 16 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DAS ATIVIDADES DE PREPARO DO SOLO MANUAL, MARCAÇÃO E PLANTIO MANUAIS, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) CLASSIFICADO (B) .....	53
FIGURA 17 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO MECANIZADA E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B) .....	55
FIGURA 18 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE COLHEITA COM MOTOSSERA E ARRASTE COM TRATOR ACOPLADO A CABEÇOTE COM CABO DE AÇO E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B) .....	57
FIGURA 19 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA COM FELLER E ARRASTE COM SKIDDER, PREPARO DO SOLO MECANIZADO, MARCAÇÃO E PLANTIO MECANIZADO E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADOS (B) .....	59
FIGURA 20 - MAPA DE FRAGILIDADE CONSIDERANDO TODOS OS CENÁRIOS SIMULTANEAMENTE .....	61
FIGURA 21 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO NAS ESTRADAS .....	63
FIGURA 22 - ALGUNS PONTOS VISITADOS NA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS SOBRE O MAPA DE FRAGILIDADE PARA A REDE “ESTADO” .....	64
FIGURA 23 - LOCAL INCLUÍDO NA CLASSSE INTERMEDIÁRIA DE FRAGILIDADE. ÁREA COM PLANTIO (A) E COM CAIXA DE CONTENÇÃO NAS ESTRADAS (B) .....	65

FIGURA 24 - EROSÃO OBSERVADA NO PONTO 10D VISITADO PARA A VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	66
FIGURA 25 - PONTO 12C, INCLUÍDO NA CLASSE INTERMEDIÁRIA DE FRAGILIDADE .....	66
FIGURA 26 - LOCAL INCLUÍDO NA CLASSE DE B FRAGILIDADE.....	67
FIGURA 27 - ÁREA COM SOLO ARENOSO E AFLORAMENTO ROCHOSO CLASSIFICADA COM FRAGILIDADE INTERMEDIÁRIA.....	68

## RESUMO

Este trabalho foi realizado em uma área de 4.352,3 ha, dos quais 2.252 ha apresentam plantio de *Pinus taeda* Linnaeus. A referida área localiza-se nos municípios de Doutor Pedrinho e Rio Negrinho-SC e pertence à empresa Battistella Florestal. O objetivo principal deste trabalho foi determinar e mapear os níveis de fragilidade ambiental considerando dois grupos de variáveis: a rede “estado” e a rede “pressão”. A rede “estado” corresponde a alguns aspectos físicos do solo como: a argila da camada superficial, a argila da camada subsuperficial, a espessura do horizonte “A” e a profundidade efetiva e, a declividade. A rede “pressão” refere-se ao impacto das atividades florestais, manutenção, preparo do solo, marcação/plantio, as quais podem ser manuais ou mecanizadas, colheita com motosserra/trator e colheita com Feller/Skidder bem como, a proteção proporcionada pela cobertura vegetal no solo. A metodologia consistiu em utilizar um programa de suporte à decisão baseado em redes de dependência e lógica *fuzzy* como ferramenta para classificação das áreas quanto ao grau de fragilidade. Os dados dos atributos físicos dos solos utilizados para a execução deste trabalho são oriundos de 554 pontos amostrais interpolados por geoestatística para toda a área de estudo. Foram utilizadas curvas de nível para a elaboração do mapa de declividade, assim como o mapa de uso do solo para a espacialização do impacto das atividades florestais nas áreas de plantio e nas estradas. Os resultados mostraram que no mapa para a rede “estado” há 4,6% da propriedade na classe de fragilidade alta, as quais correspondem a áreas com declividades acima de 36,87° ou 45%, 86,4% na classe de fragilidade intermediária e 9,0% na classe de baixa fragilidade. Quando foi considerada a rede “pressão” na avaliação, verificou-se que 78,1% das áreas de plantio pertenceram à classe intermediária de fragilidade quando são simuladas todas as atividades florestais. Para a classe de baixa fragilidade as atividades foram divididas em quatro áreas: a) 14% para a atividade de manutenção manual; b) 6,6% para as atividades manuais, como a manutenção, o preparo do solo e a marcação; c) 1,3 % para a de manutenção, preparo do solo e marcação manuais e manutenção mecanizada, e d) 0,1% para todas as anteriores mais a atividade de colheita com motosserra. Os resultados permitiram concluir que o mapa de fragilidade ambiental serve de apoio à tomada de decisão para a seleção das técnicas de manejo, assim como, quais práticas conservacionistas devem ser adotadas; todas as áreas consideradas de fragilidade alta no mapa da rede “estado” foram classificadas como de fragilidade ambiental intermediária, por ter sido considerada a variável cobertura vegetal; a fragilidade ambiental aumenta à medida que os valores de impacto das atividades florestais também aumentam, sendo menor para a atividade de manutenção manual e maior para a manutenção das estradas.

Palavras-Chave: EMDS, lógica *Fuzzy*, silvicultura, *Pinus taeda*, solos florestais, colheita florestal

## ABSTRACT

This work was carried out in an area of 4.352,3 ha, of which 2,252 ha have *Pinus taeda* Linnaeus planting that belonging to Battistella Florestal Company, located in Doutor Pedrinho and Rio Negrinho counties. The aim of this study was to determine and to map the levels of environmental fragility considering two groups of variables: the network "state" and the network "pressure". The network "state" includes some physical aspects of the soil (amount of clay on the surface and subsurface layer, horizon "A" depth and effective depth) and slope. The network "pressure" refers to the impact of forest activities (maintenance, soil preparation, marking/planting, which can be manual or mechanized, with chainsaw/tractor and harvesting with Feller/Skidder) and the protection by vegetation coverage. The method consisted in using a decision support system based on dependency networks and fuzzy logic as a tool for classification of areas on the degree of fragility. The data from the physical attributes of the soil came from 554 sampling points, which were interpolated by geostatistics for the whole area. Contour lines were used to generate a slope map, as well as the map of landuse for spatial simulation of the impact of forest activities in the areas of plantation and on the roads. The results showed that on the map for the network "state" there 4,6% of study area belong to the class of high fragility (which corresponds to areas with slope above 36.87 ° or 45%), 86,4% to intermediate fragility and 9% in the class of low fragility. When the network "pressure" was considered in the evaluation, it was found that 78,1% belonged to the intermediate class of fragility where all forest activities were simulated. For the class of low fragility the activities were divided into four areas: a) 14% to the activity of manual maintenance b) 6,6% for manual activities, such as maintenance, soil preparation, marking c) 1,3% for the maintenance, soil preparation, marking manuals and mechanized maintenance, and d) 0,1% to all previous activities plus chainsaw harvesting. The results showed that the map of environmental fragility can be used to decision support for the selection of techniques of management and conservation practices should be adopted; all areas framed in class of high fragility on the map of the network "state" were classified as intermediate environmental fragility when was considered the variable vegetation coverage; the environmental fragility increases as the values of the impact of forest activities also increase, being lower for the maintenance manual and greater for the maintenance of roads.

Keywords: EMDS, *Fuzzy* logic, forestry, *Pinus taeda*, soils forests, harvesting

## **1 INTRODUÇÃO**

As plantações florestais apresentam grande importância sócio-econômica no Brasil, gerando produtos para consumo interno ou para exportação e empregos para a população.

A silvicultura, assim como a agricultura e a pecuária iniciaram as suas atividades sem muitos cuidados em relação à alocação das suas atividades, degradando muitas vezes as áreas de nascentes, os ambientes fluviais e os solos. Em contraste, observa-se atualmente, que as empresas de base florestal estão contribuindo para a conservação dos recursos naturais, seja pelo incentivo à pesquisa, ou pela proteção de áreas de preservação, muitas vezes, além do que a legislação exige.

Em geral, a influência antrópica no meio ambiente tem sido motivo de grande preocupação da sociedade. Desde então surgem muitas pesquisas para qualificar e quantificar os danos que são causados diariamente aos nossos ecossistemas, onde torna-se primordial conhecer as características e a capacidade de uso do meio.

Um determinado ambiente apresenta características intrínsecas como relevo, tipo de solo, geologia, e de clima, que em conjunto apresentam certa vulnerabilidade natural. Quando se insere a pressão das atividades humanas, ou seja, os fatores externos não naturais ocorrentes no sistema, pode-se avaliar se eles são ou não degradantes e prejudiciais.

Deste modo, a fragilidade de um ambiente pode ser condicionada a uma determinada situação, seja ela natural devido aos seus fatores inerentes (não passível de alteração), ou ainda condicionada a influência humana, ou seja, representando um fator que pode ser controlado através do manejo e do planejamento das atividades florestais.

Esta informação torna-se ainda mais importante para as empresas de base florestal considerando-se o contexto econômico do cenário mundial, onde o destaque

no mercado de produtos florestais e, principalmente a conquista do mercado externo, exige a qualidade do produto comercializado e a garantia ao consumidor de que este advém de fonte “socialmente justa, economicamente viável e ecologicamente correta”.

Dentro deste contexto evidencia-se a importância de conhecer a fragilidade de um ambiente e a necessidade de mapeá-la, auxiliando desta forma no planejamento das atividades florestais e, por conseguinte na diminuição do seu impacto.

## **2 OBJETIVOS**

O presente estudo visou determinar e mapear os níveis de fragilidade ambiental considerando isolada e conjuntamente os aspectos físicos do solo e a execução de práticas silviculturais em uma área com plantio de *Pinus taeda* L..

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- ✓ Avaliar o uso de redes de dependência e lógica *fuzzy* como ferramentas para classificação das áreas quanto ao grau de fragilidade;
- ✓ Analisar os critérios e limites utilizados para a avaliação e para a determinação da fragilidade ambiental;
- ✓ Analisar a fragilidade ambiental em relação às atividades florestais por meio da simulação de diferentes cenários.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL

O termo fragilidade ambiental pode ser entendido como “o grau de suscetibilidade ao dano, ante a incidência de determinadas ações, ou ainda como o inverso da capacidade de absorção de possíveis alterações sem que haja perda de qualidade” (*Diccionario de la Naturaleza*<sup>1</sup>, citado por GHEZZI, 2003).

KAWAKUBO *et al.* (2005) relatam que a “fragilidade potencial” pode ser definida como a vulnerabilidade natural do ambiente e que a “fragilidade ambiental” é a vulnerabilidade natural associada aos graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem.

A análise empírica da fragilidade ambiental proposta por ROSS (1994) fundamenta-se no conceito das Unidades Ecodinâmicas preconizado por TRICART (1977), onde se parte do pressuposto que na natureza a troca de energia e matéria se relacionam em um equilíbrio dinâmico. De acordo com este conceito, TRICART (*op cit*) considera que os ambientes são estáveis quando estão em equilíbrio dinâmico e foram poupados da ação humana, encontrando-se em estado natural. Entretanto, quando este equilíbrio sofre as intervenções antrópicas, passa a ser denominado como unidade instável.

Dentro deste contexto, ROSS (1994) considera imprescindível o conhecimento básico do relevo, do solo, da geologia, do clima, do uso da terra e da cobertura vegetal. Em seu estudo, ROSS (1994) sistematizou uma hierarquia nominal de fragilidade representada por códigos: muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5). Estas categorias expressam especialmente a fragilidade do ambiente em relação ao processo ocasionado pelo escoamento superficial difuso e concentrado das águas pluviais.

---

<sup>1</sup> RAMOS, A. (coord.). **Diccionario de la naturaleza**. Madrid: Espasa-Calpe. 1987.



SPÖRL (2001) comparou três modelos metodológicos aplicados aos estudos da fragilidade ambiental, dos quais, dois foram propostos por ROSS (1994), sendo um com apoio nos Índices de Dissecção do Relevo, e o outro nas Classes de Declividade. O terceiro modelo foi proposto por CREPANI<sup>2</sup> *et al.* citado por SPÖRL (op cit) e é baseado nas Unidades Territoriais Básicas - UTB's. Através deste trabalho, a autora constatou que o principal problema está relacionado à atribuição de “pesos” às variáveis, sendo que esta avaliação é geralmente arbitrária e subjetiva, pois é complicado avaliar o quanto cada uma destas variáveis contribui para se estabelecer o grau de fragilidade.

Diversos autores fazem referência à metodologia de ROSS (op cit), dentre os quais podemos citar SILVA (2001), GHEZZI (2003), BOIKO (2004) e SANTOS (2005), que realizaram o mapeamento da fragilidade ambiental para as bacias hidrográficas do Rio Nhundiaquara, Rio Xaxim, do Rio Curralinho e o do Rio Jirau, respectivamente.

FLORIANI (2003) propôs um ajuste na metodologia de ROSS (1994) através da análise de múltiplos critérios, tendo concluído que nem sempre uma intervenção no meio é sinônimo de degradação ambiental, desde que a tecnologia empregada seja adequada ao potencial ecossistêmico existente. Desta forma, o autor sugere que novas metodologias para mapeamento da fragilidade ambiental sejam analisadas a fim de alcançar um diagnóstico por meio de critérios e indicadores condizentes com os geossistemas locais.

RODRIGUES (2000) realizou um trabalho de mapeamento de fragilidade ambiental utilizando uma metodologia de avaliação da fragilidade do ambiente relevo-solo com características do ambiente que interferem na manutenção do equilíbrio do relevo, obtendo como resultado mapas de uso da terra e de fragilidades potenciais associadas às inclinações das vertentes, geomorfologia e da fragilidade do relevo.

---

<sup>2</sup> CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P. & FLORENZANO, T. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos: INPE, 1996.

### 3.2 ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS

Grande parte das informações coletadas para a análise de dados é proveniente de amostras localizadas pontualmente dentro de um espaço geográfico. Quando se deseja obter informações contínuas de uma superfície, e ainda, disponibilizá-las visualmente em forma de um mapa, por exemplo, torna-se necessário utilizar técnicas de interpolação.

Muitos dos métodos tradicionais de interpolação incorporados em sistemas de informações geográficas (SIG) são baseados em funções matemáticas. BURROUGH (1986) apresenta vários métodos de interpolação espacial, tais como: método da poligonal, triangulação, média local das amostras e método da distância inversa. Em geral, estes métodos são facilmente implementados e razoavelmente rápidos, porém consideram que as amostras são independentes.

CÂMARA *et al.* (2004) citam que técnicas geoestatísticas podem ser utilizadas para se fazer a interpolação de dados e representar uma superfície contínua, considerando um comportamento homogêneo da estrutura de correlação espacial na área estudada e sua dependência espacial.

O que diferencia a krigagem<sup>3</sup> na geoestatística de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. A krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência (CARVALHO *et al.*, 2002).

Os métodos de krigagem usam a dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, ou seja, são estimadores ótimos muito usados no estudo da distribuição espacial de atributos do solo (VIEIRA, 2000).

---

<sup>3</sup> Nome dado ao processo de estimativa baseado na teoria das variáveis regionalizadas (geoestatística).

Diversas são as áreas onde a geoestatística pode ser aplicada. Em estudos referentes à análise de solos, a maior aplicação encontra-se na determinação da variabilidade dos atributos químicos e físicos (BURGESS e WEBSTER, 1980; KIRDA *et al.*, 1988; VIEIRA *et al.*, 1992; VAN ES e VAN ES, 1993; e SHOUSE *et al.*, 1995), apenas químicos (DAVIS *et al.*, 1995, MANZIONE, 2002, CARVALHO *et al.*, 2002, BOLFE *et al.*, 2007), ou apenas físicos (MACHADO *et al.*, 2006).

Na área florestal podemos citar o trabalho de RUFINO *et al.* (2006), que utilizou a krigagem para mapear a variabilidade espacial do potencial produtivo de um povoamento de eucalipto a partir de informações químicas e físicas de solo e de dados dendrométricos e de MELLO (2004), que aplicou a geoestatística com dados de inventário florestal de eucalipto para fazer estimativas volumétricas por talhão.

### 3.3 LÓGICA FUZZY

O termo *fuzzy* abrange um conjunto de conceitos e metodologias que permitem processar informações subjetivas (ZADEH, 1965). A utilização de um conjunto *fuzzy* é indicada sempre que for necessário lidar com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos (BURROUGH e McDONNELL, 1998).

Os sistemas de inferências baseados em lógica *fuzzy* possibilitam a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo” utilizado pelos especialistas na análise de problemas. Isto significa que o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados (MOREIRA *et al.*, 2001).

A representação rígida da classificação *booleana*, normalmente utilizada em cruzamentos de mapas efetuados nas operações de manipulação em SIG, provocam a propagação de erros e resultados não confiáveis. No exemplo citado por MEIRELLES (1997), onde se faz uma avaliação para o risco de erosão através de uma intersecção *booleana* (AND) com os seguintes parâmetros: declividade maior que 10%, textura do

solo é igual a areia e a cobertura vegetal é menor que 25%, verifica-se que o sistema será testado em seus atributos fornecendo uma resposta verdadeira ou falsa, ou seja, se o polígono não satisfizer as três condições simultaneamente, ele não será considerado. Este tipo de modelagem é equivocado, pois deve-se considerar que o risco de erosão ainda continuará existindo se a declividade for ligeiramente menor que 10%.

ZADEH (1965) propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo  $[0,1]$ . Um conjunto *fuzzy*  $A$  em um universo  $X$  é definido por uma função de pertinência e é representado por um conjunto de pares ordenados  $A = \{\mu_A(x), x\}$   $x \in X$  onde  $\mu_A(x)$  indica o quanto  $x$  é pertencente ao conjunto  $A$ .

De acordo com BONHAM-CARTER (1994), a função de pertinência de um conjunto *fuzzy* não é necessariamente linear, podendo assumir qualquer formato analítico ou arbitrário apropriado ao modelo associado. As funções de pertinência também podem ser expressas como listas ou tabelas de valores, associadas a uma tabela de atributos, por exemplo. O valor da variável medida e mapeada pode ser categórico, ordinal ou de intervalo, sendo que não há restrições práticas na escolha dos valores da função de pertinência, uma vez que eles devem refletir o grau de pertinência de um conjunto baseado no julgamento subjetivo acerca da importância do mapa e das suas várias classes.

Os valores de pertinência *fuzzy* dados de forma relativa e os operadores *fuzzy* permitem uma grande flexibilidade na modelagem. Em outras palavras, as limitações impostas pelos modelos convencionais (classificação *booleana*), podem ser eliminados pelos modelos *fuzzy*, devido à flexibilidade dos seus operadores. Além disto, a possibilidade de se utilizar valores *fuzzy* relativos, simultaneamente, à importância do mapa e da classe, permite, de forma inovadora, a variação dos pesos de acordo com as características conjuntas da região. Isto é extremamente importante no caso de Planejamento Regional ou de Recursos Naturais, pois possibilita a análise integrada do ambiente, fornecendo um modelo muito próximo à realidade (MEIRELLES, 1997).

Segundo ELLS *et al.* (1997), aplicações da lógica *fuzzy* no campo florestal e

no planejamento do uso do solo têm crescido ultimamente, devido à importância deste método na modelagem da imprecisão e na flexibilidade das constantes.

LEXER *et al.* (2000) aplicaram o conceito de lógica *fuzzy* para modelar um grupo de fatores de sítio no efeito da sustentabilidade ecofisiológica de uma espécie arbórea européia.

BOYLAND *et al.* (2006) em um estudo de planejamento de corte de madeira em florestas de diferentes fases sucessionais observaram que os limites do tipo *crisp* (onde o resultado da avaliação é dado por verdadeiro ou falso como na lógica *booleana*) utilizados para fazer as divisões das classes serais não reconhecem que a floresta cresce lentamente dentro e fora das classes, e que povoamentos próximos ao limite da classe possuem características também da classe adjacente, causando dificuldades do processo de colheita. Como alternativa, os autores sugerem a utilização da teoria da lógica *fuzzy*, onde a atribuição de um povoamento à uma classe seral é realizada de acordo com um determinado grau de pertinência, fornecendo uma dinâmica natural de incorporação nas classes, resultando assim em uma colheita mais uniforme.

A utilização do conceito da lógica *fuzzy* é encontrado também nos temas relacionados a planejamentos e zoneamentos ambientais (MEIRELLES, 1997; RUHOFF *et al.*, 2005; SILVA, 2005; FIGUEIREDO *et al.*, 2006) sendo que a utilização da lógica *fuzzy* permite avaliar o espaço continuamente e não através de limites rígidos, oferecendo uma maior flexibilidade na modelagem de dados ambientais e uma maior proximidade aos dados reais observados em campo.

### 3.4 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO PARA A ANÁLISE AMBIENTAL

As geotecnologias são consideradas como uma ferramenta indispensável na detecção, entendimento e análise dos problemas ambientais, auxiliando também na tomada de decisões.

Um sistema de suporte à decisão é um sistema programado computacionalmente, com o objetivo de aumentar a efetividade dos tomadores de decisões. O sistema possui funções específicas que permitem buscar informações e fornecer subsídios para o processo de tomada de decisão, que se desenvolve através da interação constante do usuário com um ambiente especialmente criado (SPRAGUE e WATSON<sup>4</sup> apud GIBOSCHI *et al.*, 2006).

De acordo com MEIRELLES *et al.* (2005), sistemas espaciais de apoio à decisão (SDSS – *Spatial Decision Support Systems*) combinam a tecnologia de sistema de informação geográfica - SIG com modelos matemáticos, de modo que os resultados de várias ações possam ser simulados e comparados com situações existentes, permitindo aos usuários avaliar uma série de questões hipotéticas no gerenciamento de decisões. A avaliação e a comparação de vários cenários possíveis possibilitam ao tomador de decisão encontrar a solução ótima para o problema. Uma das vantagens desta abordagem é a habilidade de apresentar as informações críticas relacionadas ao problema em questão através de mapas, integrando dados advindos de imagens de sensores remotos, modelos digitais de terreno e diversos mapas temáticos.

Os programas de suporte à decisão são de grande utilidade para o gestor no meio florestal, principalmente no auxílio de um melhor planejamento de suas atividades (ALHO *et al.*, 1997).

Os problemas no manejo florestal envolvem basicamente a tomada de decisão de como fazer um investimento, quais os métodos silviculturais que deverão ser aplicados e como ter madeira disponível para colheita em um horizonte de planejamento, garantindo a sustentabilidade com a maximização dos lucros, além de atender a função ecológica da floresta. Desta forma, o problema do manejo florestal, por um lado, é a satisfação de múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes, e por outro é a exposição dos fatores florestais às variações encontradas na natureza, à

---

<sup>4</sup> SPRAGUE, R.H.; WATSON, H.J. **Decision support systems: putting theory into practice.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 2 ed., 1989. 419 p.

tecnologia e aos fatores sócio-econômicos. Conseqüentemente, o gestor no meio florestal é desafiado a encontrar soluções que atendam a esses múltiplos objetivos. Isto tem propiciado o desenvolvimento de diversos sistemas de suporte à decisão, o que tem ajudado a compreender e avaliar diversos cenários do manejo florestal (STIRN, 2006). Os impactos do manejo sobre a paisagem são difíceis de se prever. No entanto, ferramentas de suporte à decisão e técnicas de visualização computacionais recentes podem ser uma opção de trabalho (FALCÃO *et al.*, 2006).

As aplicações de sistemas de suporte à decisão podem ser encontradas nas mais diversas áreas. Especificamente na área ambiental podem ser citados os trabalhos de DONHA (2003), que determinou a fragilidade ambiental com base na declividade, nos tipos de solos e na distância dos recursos hídricos. GIBOSCHI *et al.* (2006) desenvolveram um sistema de apoio à decisão para determinar a capacidade de uso da terra e para recomendar o uso adequado para cada classe de capacidade de uso, além de práticas de conservação e manejo do solo. MÉLLO *et al.* (2006) realizaram o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos de uma bacia a partir de um sistema de apoio à decisão.

RAUSCHER (1999), MOWRER (1997) e REYNOLDS (2005) discutem a importância e as vantagens de alguns programas de suporte à decisão utilizados para o manejo de ecossistemas florestais. Um desses programas é o Sistema de Suporte à Decisão para Gerenciamento de Ecossistemas (EMDS). Desenvolvido pelo *Pacific Northwest Research Station (USDA, Forest Service)* o EMDS é uma extensão para o *ArcGIS* (ESRI) que fornece um suporte de decisão para o planejamento e para avaliações ambientais em múltiplas escalas espaciais.

O EMDS integra dois componentes: o *NetWeaver* que avalia os dados através de uma base de conhecimento construída pelo *NetWeaver Developer (Rules of Thumb, Inc.)*, e o *Priority Analyst* que avalia os dados através de um modelo de decisão construído com o *Criterium DecisionPlus* (CDP, *InfoHarvest, Inc.*), que utiliza as técnicas: AHP (Processo Analítico Hierárquico) e a *SMART (Simple Multi-attribute Rating Technique)* para auxiliar nas decisões a respeito do ajuste da prioridade, do

alocamento de recursos, e da seleção da melhor alternativa (REYNOLDS *et al.*, 2003a).

Exemplos mais específicos da utilização do EMDS na ciência dos recursos naturais incluem a avaliação da aptidão de espécies florestais comerciais em determinadas áreas segundo critérios ecológicos (RAY *et al.*, 1998), avaliação da integridade hidrológica de bacias hidrográficas para a Agência de Proteção Ambiental Americana (REYNOLDS *et al.*, 1999; 2000), seleção de áreas para conservação (BOURGERON *et al.*, 2000; STOMS *et al.*, 2002), avaliação da sustentabilidade de um ecossistema florestal (REYNOLDS, 2001; 2003b; 2005) e a avaliação do impacto erosivo em uma bacia hidrográfica (BUENO, 2003; MEIRELLES *et al.*, 2005).

Atualmente, o termo “baseado em conhecimento” se tornou popular e geralmente significa um conjunto de conhecimentos sobre algum problema. Originalmente, entretanto, o termo teve um significado mais preciso como uma especificação lógica formal para a interpretação da informação (WATERMAN, 1986).

Sistemas baseados em conhecimento são programas especiais de computadores que resolvem problemas complexos dentro de um domínio definido, a partir da imitação do processo de pensamento humano, que é baseado em lógica, crença, regras, opinião e experiência (PLANT e STONE<sup>5</sup>, apud BUENO, 2003).

Segundo MEIRELLES *et al.* (2005) o tipo mais comum de sistema baseado em conhecimento é o sistema especialista, em que a experiência e o conhecimento dos humanos são capturados sob a forma de regras e fatos que, então, são usados para solucionar problemas. Devido a isso, comumente o termo “sistemas baseados em conhecimento” diz respeito a sistemas especialistas para predição ou apoio à decisão.

Todo sistema especialista inclui ao menos três elementos básicos: uma base de conhecimento, um mecanismo de inferência e uma interface com o usuário. A base de conhecimento contém a representação do conhecimento do domínio do problema. O mecanismo de inferência aplica as regras de lógica racional para pesquisar a base de

---

<sup>5</sup> PLANT, R., STONE, N.D. **Knowledge-based Systems in Agriculture**. Toronto, ON: McGraw-Hill. 1991.



conhecimento em busca de soluções. A interface com o usuário é conhecida como o sistema de entrada e saída que permite a troca de informações entre o usuário e o mecanismo de inferência (SAWYER e FOSTER, 1986).

Segundo GIBOSCHI *et al.* (2006), sistemas baseados em conhecimento e sistemas de informações geográficas são ferramentas que podem ser integradas em um sistema de suporte à decisão, uma vez que têm a capacidade de armazenar e processar uma vasta quantidade de informações.

A representação do conhecimento no *NetWeaver* é baseada em redes orientadas a objetos e lógica *fuzzy*, que oferecem diversas vantagens significativas sobre a representação baseada em regras mais convencionais. As bases de conhecimento do *NetWeaver* são fáceis de construir, testar e manter porque a sua representação é modular. Desta forma o usuário pode evoluir gradualmente as bases de conhecimento complexas em etapas pequenas e simples. A modularidade permite também que se eliminem erros em algum ou em todos os estágios do desenvolvimento da base de conhecimento. Finalmente, a lógica *fuzzy* fornece um cálculo formal e completo para a representação do conhecimento, que é menos arbitrária do que a metodologia usada em sistemas baseados em regras e muito mais parcimoniosa do que a utilizada em regras bivalentes (REYNOLDS, 1999).

A base de conhecimento do *NetWeaver*, segundo REYNOLDS *op cit.*, possui os seguintes elementos:

- ✓ Redes de dependência: representam os tópicos do interesse no domínio do problema que vai ser avaliado;
- ✓ *Data Links*: consultam e avaliam dados;
- ✓ Nós ou operadores: especificam relações lógicas ou matemáticas entre as redes de dependência e os *data links*;
- ✓ Grupos de avaliação: são opcionais, que representam as coleções de redes de dependência e *data links*.

O objeto mais importante da base de conhecimento do *NetWeaver* é a rede de

dependência (STONE *et al.* <sup>6</sup>, citado por REYNOLDS, 1999) em função do seu papel central em formular uma representação do problema, o que pode ser melhor entendido devido ao conhecimento intuitivo mínimo que possuímos do conceito das redes, baseados em exemplos comuns no mundo real, como estradas que ligam cidades. Em geral, as redes compreendem as informações de como as coisas são conectadas umas às outras.

As redes de dependência são utilizadas em análises de sistemas para formalizar o atual entendimento científico dos relacionamentos hierárquicos entre conceitos, processos e dados. As redes de dependência são compostas por objetos e a integração desses objetos pode ser ponderada, sendo o seu valor “verdade” determinado através de operações matemáticas (BUENO, 2003).

O programa permite que os *data links* sejam simples (o dado de entrada é lido diretamente) ou calculados (avalia uma expressão matemática), sendo que os *data links* simples podem possuir um argumento do tipo *crisp* ou do tipo *fuzzy* (MILLER e SAUNDERS, 2002).

Quando os dados são comparados a um argumento do tipo *crisp* o resultado da avaliação é dado como verdadeiro ou falso (1 e -1, respectivamente), como na lógica *booleana*. Por outro lado, quando os dados são comparados a um argumento *fuzzy* o resultado da avaliação é o valor “verdade”, que no *NetWeaver* está contido no intervalo [1,-1], sendo que o valor “verdade” -1 significa falso, não suporta a proposição, e o valor “verdade” 1 significa verdadeiro, ou seja, suporta totalmente a proposição (REYNOLDS *et al.*, 2003a).

---

<sup>6</sup> STONE, N.D.; COULSON, R.N.; FRISBIE, R.E.; LOH, D.K. Expert systems in entomology: three approaches to problem solving. **Bulletin of the Entomological Society of America**. v.32, p. 161-66. 1986.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se nos municípios de Rio Negrinho e Doutor Pedrinho-SC, e pertence à empresa Battistella Florestal. A área total da propriedade é de 4.352,3 ha, dos quais 2.252 ha (51,7%) apresenta plantios de *Pinus taeda* L.

As coordenadas geográficas centrais aproximadas da área de estudo são 640.000E e 7.050.000S segundo o sistema de projeção cartográfica UTM Datum SAD-69 fuso 22S (Figura 1).

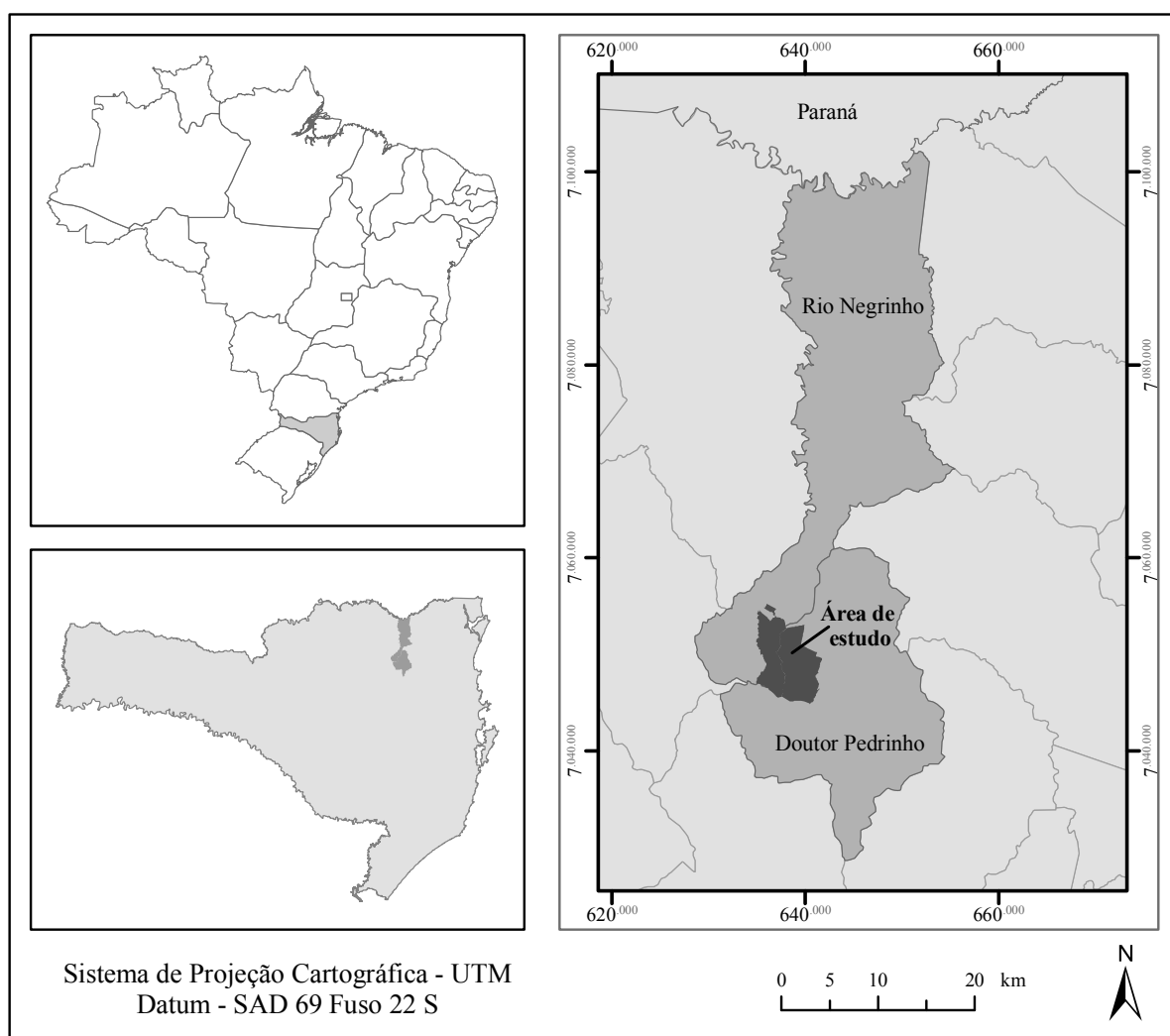


FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Segundo as descrições geomorfológicas do Estado de Santa Catarina, elaboradas pelo 11º Distrito do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 1986), a área de estudo está situada no Domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares, na “Região do Patamar Oriental da Bacia do Paraná” e na “Unidade do Patamar de Mafra”.

O relevo é uma superfície regular, quase plana, que no conjunto é individualizado como um patamar intermediário, predominantemente constituído por uma superfície colinosa. Os limites desta unidade com o planalto dos “Campos Gerais” são, em alguns pontos, a Cuesta da Serra Geral, com um desnível de cerca de 300 m em média. As cotas altimétricas decaem de leste para oeste, atingindo, junto à Serra Geral, valores entre 650 a 740 m (DNPM, 1986).

A geologia desta unidade é representada pelo “Grupo Itararé”, que compreende, na bacia do Paraná, todo o pacote de sedimentos de origem glacial e periglacial relacionado ao Carbonífero Superior e Permiano Inferior, a saber:

- ✓ Formação Mafra – é constituída por seqüência flúvio-marinha com predomínio de arenitos esbranquiçados, amarelados e avermelhados, finos a grosseiros. Ocorrem também diamictitos, ritmitos, conglomerados, argilitos e argilitos várlicos. A área aflorante é expressiva, especialmente na divisa com o Paraná.
- ✓ Formação Rio do Sul – em Santa Catarina, a porção inferior desta formação é constituída de folhelhos e argilitos cinza-escuros. Sobre estes aparecem diamictitos acinzentados, com matrizes arenosas, intercaladas com arenitos muito finos. Estes, por sua vez, estão recobertos por folhelhos, normalmente várlicos, argilitos, ritmitos e siltitos.

De acordo com dados climáticos de estações meteorológicas da EPAGRI, próximas à região da área de estudo, a precipitação média anual é de 1.726 mm, a temperatura máxima média do trimestre mais quente (janeiro, fevereiro e março)

alcança 28,4°C e a temperatura mínima média do trimestre mais frio (junho, julho e agosto) é de 9,3°C. Desta forma verifica-se que a região se enquadra no Grupo C – Mesotérmico, da classificação climática de Köeppen, visto que as temperaturas médias do mês mais frio estão abaixo de 18°C e acima de -3°C. Por outro lado, observa-se que a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C, caracterizando o clima *Cfa*, ou seja, clima tropical, com verão quente, sem estação seca de inverno.

#### 4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS

A primeira etapa deste trabalho consistiu em reunir todas as informações disponíveis da área de estudo e que fazem parte da análise da fragilidade ambiental. Estas informações referem-se basicamente às características físicas do ambiente natural, que na avaliação são denominadas “estado e as atividades silviculturais realizadas pelo homem, denominadas como “pressão”.

A denominação “estado” e “pressão” é proveniente da classificação da OCDE (1993), onde os indicadores ambientais são sistematizados pelo modelo Pressão-Estado-Resposta (PER), assim definidos:

- a) Pressão - caracterizam as pressões sobre os sistemas ambientais e podem ser traduzidos por indicadores de emissão de contaminantes, intervenção no território e de impacto ambiental;
- b) Estado - reflete a qualidade do ambiente num dado horizonte espaço/tempo; são, por exemplo, os indicadores de sensibilidade, risco e qualidade ambiental;
- c) Resposta - avaliam as respostas da sociedade às alterações e preocupações ambientais, bem como à adesão a programas e/ou à implementação de medidas em prol do ambiente; podem ser incluídos neste grupo os indicadores de adesão social, de sensibilização e de atividades de grupos sociais importantes.

No presente estudo foi considerado apenas os indicadores “estado” e “pressão”.

Para representar o “estado” foram definidas como variáveis a declividade do terreno e quatro características referentes aos atributos físicos do solo (percentagem de argila na camada superficial, percentagem de argila na camada subsuperficial,

espessura do horizonte “A” e profundidade efetiva do solo).

A “pressão” é representada por duas variáveis: a primeira é denominada “cobertura” e refere-se à proteção vegetal proporcionada ao solo, e a segunda variável corresponde às seguintes atividades florestais: preparo do solo (mecanizado e manual), marcação e plantio (mecanizado e manual), manutenção (mecanizada e manual), dois métodos de colheita florestal (corte com motosserra e arraste com trator com cabo de aço (TC), posicionado na estrada e corte com trator tipo Feller e arraste com trator tipo Skidder) e a manutenção das estradas e dos aceiros.

Desta forma, as combinações entre o “estado” e a “pressão” fornecem cenários do que pode ocorrer com o ambiente quando determinada atividade é realizada.

#### 4.2.1 Estado

Os dados que caracterizam os aspectos físicos do solo são provenientes de um levantamento de solos realizado por BOGNOLA (2007). Neste estudo o autor realizou, primeiramente, a fotointerpretação de fotografias aéreas (na escala de 1:25.000) para delimitar as principais unidades fisiográficas (topos, terços superiores, médios e inferiores de encostas, várzeas etc.) possibilitando a elaboração de uma legenda de solos preliminar. Esta etapa foi realizada com o apoio de mapas planialtimétricos, geológicos, geomorfológicos, de clima e de vegetação. Em seguida foi realizado o levantamento pedológico detalhado em campo, na escala 1:10.000, através de prospecções gerais efetuadas por meio de tradagens (trado holandês) até 1,20 m e em alguns casos até 1,50 m ou através de perfis de solos em barrancos de estradas para cada 40 ou 50 ha, que permitiram aferir os limites pré-estabelecidos nas fotografias aéreas. Nessas prospecções foram coletadas informações (cor, textura, gradiente textural, tipo e espessura do horizonte “A” e “B”, profundidade do *solum*, profundidade efetiva, posição do solo na paisagem, etc.) de 554 pontos amostrais

(Figura 2) para a identificação das classes de solos até o sexto nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006). O gradiente textural foi caracterizado através da porcentagem de argila da camada superficial (0-20 cm) e da camada subsuperficial (30-50 cm).

Outra variável utilizada neste estudo foi o mapa de declividade, elaborado a partir das curvas de nível com equidistância de 10 m.

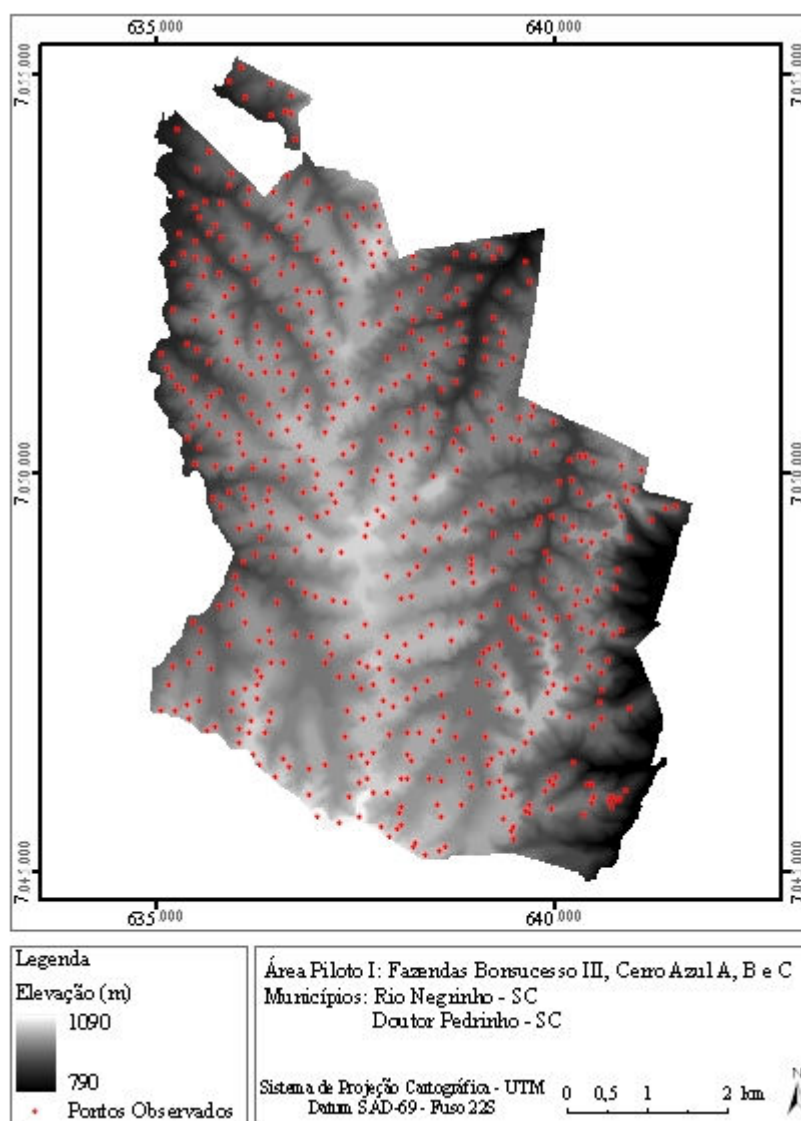


FIGURA 2 – MAPA COM A LOCALIZAÇÃO NO MODELO DIGITAL DO TERRENO DOS 554 PONTOS AMOSTRAIS UTILIZADOS PARA REPRESENTAR OS ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS

#### 4.2.2 Pressão

A proteção ocasionada pela cobertura vegetal é considerada apenas para as áreas de plantio onde as atividades são realizadas. No entanto não foi coletado nenhum dado referente à quantidade de cobertura vegetal existente para cada atividade. Deste modo, para representar a cobertura vegetal determinou-se arbitrariamente que uma superfície 100% coberta corresponde a áreas com floresta densa e dossel fechado, como em uma floresta natural, e 0% para áreas sem cobertura. As superfícies onde são realizadas a maioria das atividades deste estudo (exceto a manutenção das estradas, que refere-se a uma área sem cobertura vegetal) correspondem a locais que apresentam alguma cobertura vegetal. Embora seja um valor indeterminado, sabe-se que ela existe e é proporcionada pela presença de floresta desbastada, regeneração de gramíneas e/ou pioneiras, acículas ou ainda restos da colheita.

O grau de impacto das atividades florestais realizadas nestas áreas foi disponibilizado por meio de um documento intitulado: *Plano de Gestão de Impactos Ambientais*<sup>7</sup>, que fornece diretrizes e recomendações para tornar menos impactante as atividades que a empresa mantém em suas áreas. Neste plano foi utilizada uma metodologia adaptada da Matriz de Leopold<sup>8</sup>, que consistiu em avaliar o impacto (Tabela 1) através das seguintes variáveis:

- ✓ Magnitude: envolve a medida da intensidade do impacto através de indicadores qualitativos ou quantitativos, quando possível. É um parâmetro de comparação entre os impactos e pode ser: pequeno, médio ou grande.
- ✓ Amplitude: indica a abrangência espacial ou área de influência do

---

<sup>7</sup> Fornecido por Battistella Florestal.

<sup>8</sup> Metodologia amplamente adotada para a avaliação de impactos ambientais, a qual consiste em estabelecer o grau de alteração provocado por algum empreendimento, a importância e a intensidade do efeito na área de influência do empreendimento ou fora dela (LEOPOLD *et al.*, 1971).



impacto. Divide-se em: L (local) quando o impacto for restrito apenas ao local onde ocorre (talhão/projeto), ou R (regional) quando o impacto pode causar danos que ultrapassam os limites do projeto ou talhão podendo se refletir em efeitos sobre a área da unidade de manejo florestal e entorno;

- ✓ Tempo de Duração: retrata o período ou tempo de duração do impacto considerando o horizonte de tempo de uma rotação. Os impactos podem ser: T (temporários), quando ocorrem apenas durante certo período de tempo ou fase do projeto florestal; C (cíclicos), quando ocorrem durante períodos diferentes ou se repetem ciclicamente; ou P (permanentes), quando não tem fim previsível;
- ✓ Reversibilidade: refere-se à capacidade de reversão ou recomposição do ambiente sob efeito do impacto, podendo ser: R (reversível), quando o ambiente se recupera espontaneamente ou através de medida de recomposição; PR (parcialmente reversível), quando o novo ambiente, apesar de poder ser recuperado, apresenta características básicas diferenciadas de seu antecessor; ou IR (irreversível), quando a não há recomposição possível e as medidas são de caráter compensatório.

Cada variável recebe um valor (Tabela 1) referente ao impacto da atividade avaliada. O grau de impacto é dado pela soma dos valores de todas as variáveis.

TABELA 1 - VALORES NUMÉRICOS POR VARIÁVEL AVALIADA

Variável	Parâmetro	Valor
Magnitude	Pequena	1
	Média	2
	Grande	3
Amplitude	Local	1
	Regional	2
Tempo de duração	Temporário	1
	Cíclico	2
	Permanente	3
Reversibilidade	Reversível	1
	Parcialmente Reversível	2
	Irreversível	3

Fonte: Plano de Gestão de Impactos Ambientais, Battistella Florestal (2003).

Deste modo, a atividade menos impactante recebe valor 4 e a mais impactante valor 11. No entanto, as atividades florestais consideradas para este estudo receberam valores que variaram de 4 a 8 (Tabela 2).

TABELA 2 - VALORES ATRIBUÍDOS ÀS ATIVIDADES FLORESTAIS ATRAVÉS DA MATRIZ DE LEOPOLD

Atividades	Magnitude	Amplitude	Reversibilidade	Tempo de duração	Soma
Preparo do solo mecanizado	3	2	2	1	8
Preparo do solo manual	2	1	1	1	5
Marcação mecanizada	3	2	2	1	8
Marcação manual	2	1	1	1	5
Manutenção mecanizada	2	1	2	1	6
Manutenção manual	1	1	1	1	4
Colheita Motosserra/TC	2	2	2	1	7
Colheita Feller/Skidder	3	2	2	1	8
Manutenção de Estradas	2	2	2	2	8

Fonte: Plano de Gestão de Impactos Ambientais, Battistella Florestal (2003).

A seguir é apresentada sucintamente, uma descrição das atividades utilizadas neste estudo.

- **Preparo do solo:** Esta atividade é realizada antes do plantio e visa retirar os resíduos lenhosos do solo, descompactar o solo ou apenas diminuir a altura da vegetação para evitar a competição com as mudas de Pinus, além de auxiliar nas atividades de marcação para o plantio e para o plantio propriamente dito. O preparo do solo mecanizado é realizado com um trator tipo esteira acoplado a uma lâmina tipo ancinho, onde os resíduos lenhosos do solo são removidos e enleirados dentro do talhão. A descompactação do solo, se necessária, é feita com trator esteira acoplado a um *ripper*. Já o preparo do solo manual é realizado com roçadeira costal ou foice.

- **Marcação:** A marcação para o plantio tem por finalidade indicar o local onde as mudas de Pinus serão plantadas. A marcação mecanizada é realizada com uso de trator agrícola acoplado com plataforma de disco, já a manual é com o uso do sacho. O plantio propriamente dito é sempre realizado manualmente com auxílio de enxadão.

- **Manutenção:** A atividade de manutenção é realizada até os quatro anos de idade, e tem por finalidade diminuir a competição por solo e nutrientes de

gramíneas e pioneiras com o *Pinus*. Na atividade de manutenção manual podem ser utilizados os seguintes tratos: coroamento manual com enxada a um raio aproximado de 80 cm da planta; roçada com foice ao longo da linha de plantio e roçada com roçadeira costal ao longo da linha de plantio. A manutenção mecanizada é realizada ao longo da entrelinha de plantio com uma roçadeira acoplada a um trator.

- **Manutenção das estradas:** Esta atividade é realizada, na maioria das vezes, após a colheita florestal principalmente se esta ocorreu em período chuvoso. A atividade de manutenção visa reparar os efeitos causados pelo tráfego de caminhões e tratores nas estradas, onde pode ser realizado o nivelamento da pista de rolamento com uma motoniveladora, a reposição do revestimento das estradas, além da instalação de caixas de contenção para águas pluviais nos pontos mais críticos das estradas.

- **Colheita Florestal:** As operações de colheita florestal nas áreas da empresa são realizadas basicamente de acordo com as limitações de declividade que o terreno apresenta. As áreas com terreno fortemente ondulado indicam que o método de colheita deve ser o menos impactante possível, neste caso é utilizado uma motosserra para o corte da árvore, e um trator com cabo de aço posicionado na estrada para o arraste das árvores. Em áreas onde o relevo é mais plano, a derrubada é realizada com um trator do tipo escavadeira hidráulica com cabeçote do tipo *feller-buncher*, e o arraste é realizado com o *skidder*.

Como se pode observar na Tabela 2, as atividades mecanizadas realizadas dentro do talhão são as que apresentam maiores valores de impacto, como o preparo do solo, marcação e a colheita com o *feller/skidder*.

Segundo CAMARGO (1999) a colheita mecanizada da madeira pode trazer prejuízos através de injúrias causadas às árvores remanescentes pelo tráfego das máquinas, e também pela queda da capacidade produtiva do sítio, devido às alterações físicas provocadas pelo processo de compactação do solo. De acordo com DEDECEK e GAVA (2005) as atividades de colheita, baldeio e preparo do solo para posterior plantio alteram a estrutura e os atributos físico-hídricos do solo, dificultando o crescimento e a distribuição das raízes e, conseqüentemente, o desenvolvimento da

floresta.

WORRELL e HAMPSON (1997) citam que o movimento das máquinas pode remover o solo e, conseqüentemente, reduzir a infiltração da água, aumentando assim o risco de erosão. Desta forma, FENNER (1996) sugere que se deve evitar transitar com as máquinas em solos muito úmidos, concentrando o tráfego em ramais de extração, além de utilizar tratores de pneus largos e com baixa pressão de contato com o solo.

Para espacializar os dados referentes à “pressão” utilizou-se o mapa de uso do solo, o qual fornece a delimitação das áreas de plantio (Figura 3).

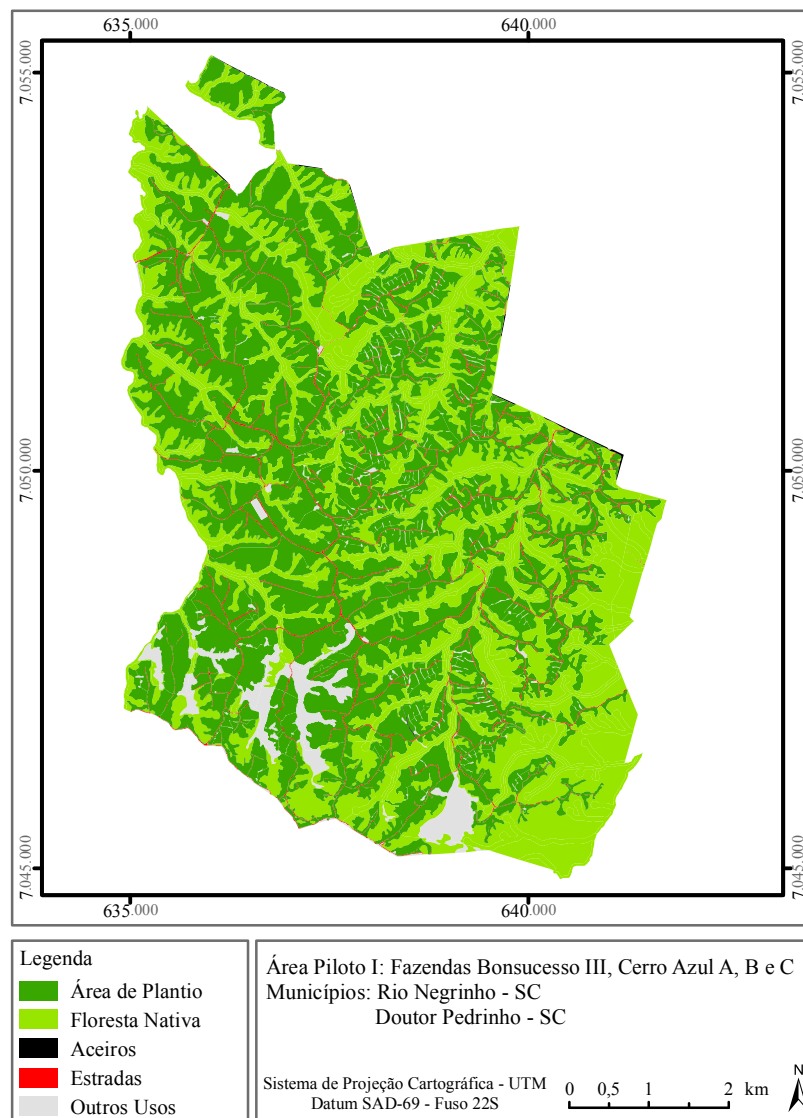


FIGURA 3 – MAPA DE USO DO SOLO UTILIZADO PARA REPRESENTAR A “PRESSÃO”

### 4.3 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados para a análise da fragilidade ambiental devem estar representados em planos de informações (mapas vetoriais). Desta forma foram elaborados os mapas dos atributos físicos do solo e de declividade.

#### 4.3.1 Atributos Físicos dos Solos

As predições dos atributos físicos do solo (argila superficial, argila subsuperficial, espessura do horizonte “A” e profundidade efetiva do solo) para áreas não amostradas a partir de informações observadas em 554 pontos foram produzidas por Krigagem. Para os cálculos, produção dos gráficos e ajuste do semivariograma utilizou-se o programa estatístico R e o pacote GeoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2001), ambos os programas livres dentro da licença internacional GPL (*General Public Licence*).

Primeiramente foi efetuada uma análise descritiva dos dados para avaliar a homogeneidade, pontos discrepantes e a normalidade dos dados. A estimação por krigagem apresenta melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita (PAZ-GONZALEZ *et al.*, 2001). Para verificar a existência de dependência espacial foram realizadas as análises exploratórias de cada variável através do semivariograma experimental.

O semivariograma é expresso através da função  $\gamma(h)$ , conhecida como semivariância, que é definida como a metade da esperança da variância entre pares de pontos separados por uma distância ( $h$ ). Os parâmetros do semivariograma (Figura 4), segundo CAMARGO (1997) são:

- ✓ *Alcance* ( $a$ ): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- ✓ *Patamar* ( $C_0 + C_1$ ): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance ( $a$ ). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância;

- ✓ *Efeito Pepita ( $C_0$ )*: idealmente,  $\gamma(0) = 0$ . Entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma(0)$  se aproxima de um valor positivo chamado “Efeito Pepita ( $C_0$ )”, que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras;
- ✓ *Contribuição ( $C_1$ )*: é a diferença entre o patamar e o Efeito Pepita.

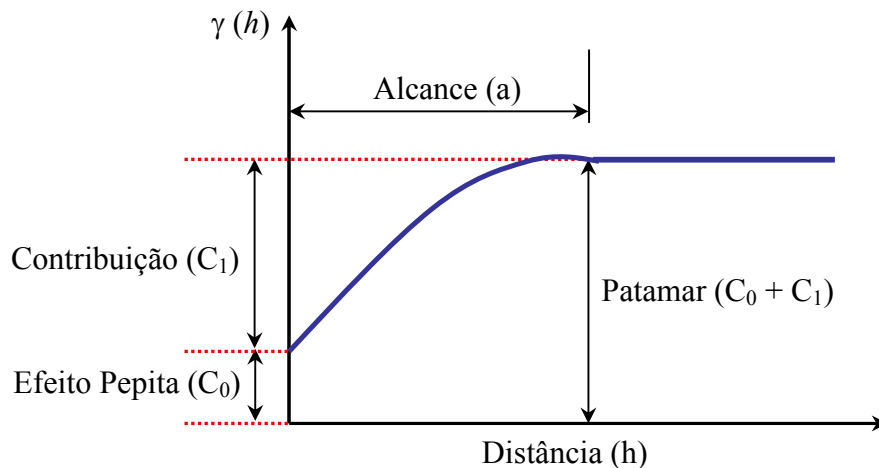


FIGURA 4 - EXEMPLO DE UM SEMIVARIOGRAMA TÍPICO

Segundo RIBEIRO JUNIOR (1995), os semivariogramas são preferidos para caracterizar a estrutura de continuidade espacial da característica avaliada por exigirem hipóteses de estacionaridade menos restritivas, ou seja, a variância das diferenças entre dois pontos amostrais só depende desta diferença, sendo a mesma para toda a área avaliada. Desta maneira, é esperado que a semivariância  $\gamma(h)$  aumente com a distância  $h$ .

O grau de dependência espacial foi verificado através da relação entre a contribuição ( $C_1$ ) e o patamar ( $C_0 + C_1$ ), que de acordo com CAMBARDELLA *et al.*<sup>9</sup>, citado por MELLO (2004), quando for maior ou igual a 75%, denota forte dependência espacial.

Neste trabalho foi utilizado o modelo exponencial (1) para o ajuste do

---

<sup>9</sup> CAMBARDELLA, C.A. MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science of American Journal*, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

semivariograma por se apresentar mais adequado ao formato da curva dos dados. É importante que o modelo ajustado represente a tendência de  $\gamma(h)$ , em relação a distância  $h$ . Deste modo, as estimativas obtidas a partir da krigagem serão mais exatas e, portanto, mais confiáveis. O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, mas sim iterativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefini-lo, até obter um modelo que seja considerado satisfatório (CAMARGO, 1997).

O modelo exponencial é dado pela seguinte expressão:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 [1 - \exp(-h/a)] & \text{se } 0 < h \leq a, \\ C_0 + C_1 & \text{se } h > a \\ 0 & \text{se } h = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Onde:

$C_0 + C_1$  = patamar;

$a$  = alcance;

$h$  = distância.

Após o ajuste do semivariograma, e da verificação de existência de dependência espacial entre os dados, procedeu-se à krigagem para se estimar os valores das variáveis físicas do solo para toda a área de estudo. Foi utilizada a Krigagem Ordinária, que, de acordo com CAMARGO (1997) é a hipótese mais simples sobre o comportamento da variável regionalizada (uma variável distribuída no espaço cujos valores são considerados como realizações de uma função aleatória), onde a média do fenômeno  $\mu(x)$  seja constante na região de estudo, o que implica em não haver variação significativa na larga escala.

Para a krigagem propriamente dita foi utilizada a extensão *Geoestatistical Wizard* do programa (*ArcGIS 9*), onde os parâmetros ajustados através da função de Máxima Verossimilhança do programa “R” foram digitados nos campos respectivos.

#### 4.3.2 Declividade

O mapa de declividade foi gerado a partir de um arquivo digital com as curvas de nível (eqüidistância de 10 metros) através da extensão 3D *Analyst* do *software ArcGIS 9*, tendo-se primeiramente, elaborado o modelo numérico do terreno (MNT) através do TIN (*Triangulated Irregular Network*) que, em seguida, foi convertido em um mapa de declividade.

#### 4.4 ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

A metodologia utilizada neste trabalho consiste basicamente em duas etapas: (a) elaboração das redes de dependência e atribuição dos valores da função de pertinência *fuzzy* para cada uma das variáveis no programa *NetWeaver* e (b) execução e a avaliação final através da extensão *EMDS* para o *ArcGIS 9.0*.

No programa *NetWeaver* a base do conhecimento é representada por objetos que são arranjados hierarquicamente e expressos graficamente por redes.

Para este estudo considerou-se que a rede “fragilidade ambiental” é dependente de outras duas redes: a rede “estado” e a rede “pressão”.

A rede “estado” por sua vez é dependente dos *data links*, que neste caso são: percentagem de argila da camada superficial, percentagem de argila da camada subsuperficial, espessura do horizonte “A”, profundidade efetiva do solo e declividade. Já a rede “pressão” é dependente dos *data links* cobertura e atividade florestal.

Quando um *data link* é criado, define-se os argumentos de como os dados serão avaliados, que podem ser do tipo clássico (*crisp*) ou nebuloso (*fuzzy*). Um argumento do tipo clássico é baseado na lógica bivalente, onde o valor “verdade” de uma proposição é totalmente verdadeiro ou totalmente falso. Já no argumento tipo nebuloso os dados são comparados a um argumento *fuzzy* definidos por uma função de pertinência, onde o valor “verdade” resultante da rede é expresso pelo grau com que aquele dado suporta a proposição definida, ou seja, pode-se ter valores parcialmente



verdadeiros ou parcialmente falsos. Neste trabalho foi utilizado um argumento do tipo *fuzzy* para a proposição : “fragilidade ambiental em relação às atividades florestais”.

Todos estes objetos, as redes e os *data links*, são conectados entre si através de operadores lógicos. Neste estudo foi utilizado o operador *UNION* (2), o qual trata seus antecedentes como uma evidência que contribui na sustentação de uma proposição, sendo que cada argumento pode compensar o outro, dependendo da utilização de pesos ou não.

$$UNION = \frac{(valor_1 * peso_1 + valor_2 * peso_2 + ... + valor_n * peso_n)}{peso_1 + peso_2 + peso_n} \quad (2)$$

Desta forma, para evitar que uma variável extremamente negativa compense igualmente outra extremamente positiva, foram adotados pesos diferenciados para cada uma das variáveis da rede “estado”. Assim considera-se que elas contribuem de maneira diferente na representação da fragilidade (Tabela 3). Para a rede “pressão” não foi determinado nenhum peso, pois não há informações suficientes para afirmar qual variável contribui mais para a fragilidade ambiental (falta de cobertura ou a atividade florestal) deste modo ambas apresentaram peso 1.

TABELA 3 – PESOS UTILIZADOS PARA AS VARIÁVEIS DA REDE “ESTADO”

VARIÁVEIS	Peso
Declividade	5
Argila da camada superficial	4
Profundidade Efetiva	3
Espessura do horizonte A	2
Argila da camada subsuperficial	1

Os valores dos pesos (Tabela 3) foram determinados com base em estudos publicados, e com a ajuda de especialistas. De acordo com COGO *et al.* (2003) a inclinação do terreno é um dos fatores que influencia fortemente as perdas de solo e água por erosão hídrica, pois, à medida que ela aumenta, aumentam o volume e a velocidade da enxurrada e diminui a infiltração de água no solo. Com isso, aumenta a capacidade de transporte das partículas de solo pela enxurrada, assim como a própria capacidade desta de desagregar solo, por ação de cisalhamento, principalmente quando

concentrada nos sulcos direcionados no sentido da pendente do terreno. BERTONI e LOMBARDI NETO (1985) citam que as propriedades dos solos que mais influenciam a erodibilidade pela água, são: a) as que afetam a velocidade de infiltração, a permeabilidade e a capacidade de absorção de água e b) aquelas que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e às forças de transporte pela chuva e escoamento.

De acordo com LEPSCH (1991), é também de grande importância conhecer-se a textura da camada superficial e subsuperficial de um solo, principalmente para estimar a sua susceptibilidade à erosão, pois as indicações sobre trabalhos mecânicos, erodibilidade e avaliação de outras características são mais precisas quando se conhece as texturas dos horizontes “A” e “B”. Uma textura arenosa (argila de até 15%) predispõe mais o solo à erosão entre sulcos do que uma textura muito argilosa (mínimo de 60% de argila), uma vez que na primeira há menor estabilidade dos agregados, permitindo assim a ação desagregadora do impacto das gotas da chuva (FAVARETTO *et al.*, 2006a).

Já a profundidade efetiva de um solo é de grande importância para a infiltração da água, pois quanto maior o volume de solo, maior será a capacidade de retenção de água, diminuindo o escoamento superficial.

O horizonte “A” (horizonte com maior teor de matéria orgânica no perfil de solo) com sua espessura foi considerado neste estudo em função da sua influência na estabilidade dos agregados do solo e consequentemente na susceptibilidade a erosão, justamente pelo teor de matéria orgânica que apresenta. O teor de matéria orgânica tem grande relação com a erodibilidade do solo, teores mais elevados, fazem com que a capacidade de aglutinação nas partículas seja maior, favorecendo a capacidade de retenção de água e sua infiltração. No entanto, solos com teores muito elevados de matéria orgânica, a susceptibilidade à erosão pode ser aumentada, devido ao tamanho pequeno dos grânulos (estrutura granular) e sua baixa densidade (GONÇALVES, 2002).

Deste modo, a análise da fragilidade ambiental propriamente dita foi realizada através da extensão *EMDS* para o *ArcGIS* 9, tendo-se primeiramente,

adicionado todos os planos de informação (mapas vetoriais) da área de estudo e, em seguida efetuado-se a leitura da base de conhecimento elaborada no *NetWeaver* para finalmente executar a análise.

#### 4.5 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

A validação dos resultados deste trabalho refere-se a dois aspectos: a estimativa dos atributos físicos do solo pelo método geoestatístico, e em relação à fragilidade.

No que diz respeito ao primeiro aspecto, constatou-se que não havia necessidade de realizar uma validação, pois de acordo com um especialista na área de geoestatística<sup>10</sup>, quando se utiliza uma grande quantidade de pontos, como neste caso (554), os valores estimados são muito próximos do valor real. Deste modo a validação acrescentaria pouco ou nada a um modelo bem ajustado e com uma análise descritiva e exploratória bem realizada.

Em relação à fragilidade, esta só pôde ser realizada sobre o mapa da rede “estado”, visto que na época da validação em campo nenhuma atividade florestal estava sendo realizada.

A metodologia adotada para a validação da fragilidade consistiu primeiramente na elaboração de um *grid* de 500 m x 500 m, o qual foi impresso sobre os mapas de uso do solo e de fragilidade da rede “estado”, sendo este dividido preliminarmente em sete classes de valor “verdade”. O *grid* foi utilizado para auxiliar na orientação e na localização dos pontos a serem observados, de modo que todas as sete classes de fragilidade fossem contempladas ao longo da área de estudo.

Em cada ponto foi avaliado se a respectiva classe de fragilidade obtida pelo método proposto correspondia a uma fragilidade intrínseca observada qualitativamente em termos de solo e declividade. Para representar este processo de validação, foram tomados como exemplos 13 pontos, os quais foram descritos e documentados com fotografias.

---

<sup>10</sup> Prof. Dr. Paulo Justiniano Ribeiro Junior, Laboratório de Estatística e Geoinformação, Departamento de Estatística da Universidade Federal do Paraná. Comunicação pessoal.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

A seguir é apresentada apenas a caracterização dos dados encontrados para os atributos físicos do solo, que fazem parte da rede “estado”, visto que para as outras variáveis nenhum dado foi processado, pois já se encontravam disponíveis e foram descritos no item 4.2.

O primeiro passo do processo de análise consistiu em estabelecer medidas quantitativas para cada uma das variáveis que caracterizam os aspectos físicos do solo (argila da camada superficial, argila da camada subsuperficial, profundidade efetiva do solo e espessura do horizonte “A”) e que fazem parte da rede “estado”. Foi observado na área de estudo que o teor de argila da camada superficial está entre 8 e 58%; a da camada subsuperficial entre 10 e 62%; a espessura do horizonte A possui de 5 até 100 cm; e a profundidade efetiva do solo está entre 15 e 130 cm (Tabela 4). Os dados da Tabela 4 mostram que todas as variáveis apresentam coeficiente de variação acima de 30%, indicando uma acentuada dispersão dos seus valores em torno da média.

TABELA 4 – MEDIDAS QUANTITATIVAS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DOS SOLOS

Variável	n° Obs.	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Argila Superficial (%)	554	8	58	24	25,16	7,76	30,83
Argila Subsuperficial (%)	554	10	62	27	28,63	9,03	31,53
Horizonte A (cm)	554	5	100	40	42,79	16,02	37,45
Profundidade Efetiva (cm)	554	15	130	70	71,07	22,55	31,75

### 5.2 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS

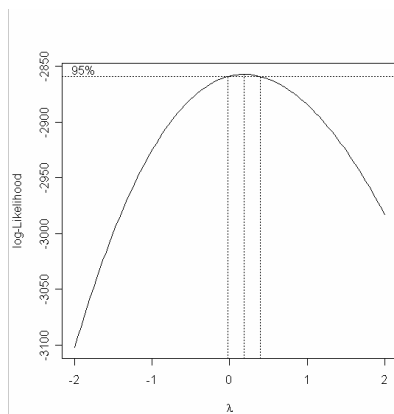
Nesta seção é apresentada a espacialização dos dados através dos mapas dos atributos físicos dos solos e da declividade.

#### 5.2.1 Atributos Físicos dos Solos

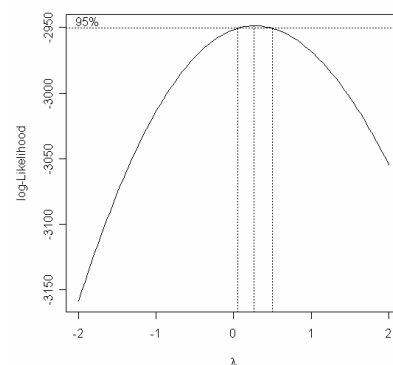
A análise descritiva dos dados dos atributos físicos do solo mostrados no

item 5.1 mostrou certo grau de heterogeneidade dos mesmos. A necessidade de transformação dos dados foi verificada através do gráfico *Box-Cox* (BOX e COX, 1964). O gráfico sugere que o valor de  $\lambda$  esteja entre 0,1 e 0,4 para as variáveis argila superficial (Figura 5a) e entre 0,1 e 0,5 para a argila subsuperficial (Figura 5b). Desta forma, optou-se por utilizar  $\lambda = 0,25$  (transformação raiz quarta) para as duas variáveis que possuem a mesma grandeza.

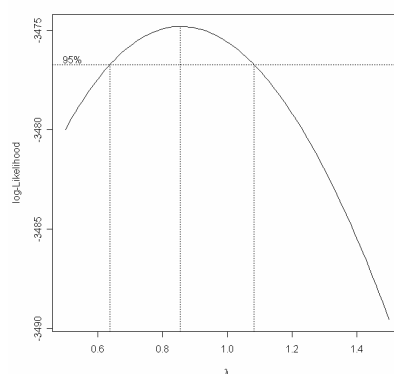
Já para a variável profundidade efetiva do solo e espessura do horizonte “A”, o gráfico *Box-Cox* mostra que o valor 1 está contido no intervalo de confiança para  $\lambda$  (Figura 5c e 5d), indicando que a não transformação dos dados atingirá resultados tão próximos quanto a utilização do valor de  $\lambda$  que maximiza esta função.



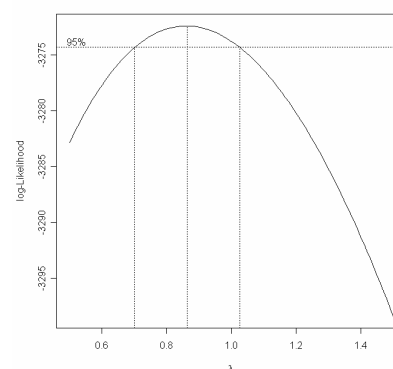
(a) Argila Superficial



(b) Argila Subsuperficial



(c) Profundidade Efetiva



(d) Profundidade do Horizonte “A”

FIGURA 5 – GRÁFICOS *BOX-COX* PARA AS VARIÁVEIS DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Após a análise exploratória dos dados, o próximo passo consistiu em ajustar o semivariograma, utilizando o modelo exponencial para todas as variáveis. Os parâmetros do semivariograma foram ajustados pelo Método de Máxima Verossimilhança, executado no programa “R”. MELLO (2004), trabalhando com dados para fazer estimativas volumétricas de eucalipto encontrou melhores resultados de ajuste pelo método da verossimilhança do que pelo método dos mínimos quadrados ponderados, vantagem também apontada por DIGGLE e RIBEIRO JUNIOR (2000).

O coeficiente de efeito pepita dado através do índice de dependência espacial (DE%) sugere que as variáveis argila superficial e argila subsuperficial apresentam forte dependência espacial (DE% >75%) até uma distância de 1.598 m e de 1.847 m definidos através dos parâmetros  $\phi = 0,5329$  e  $\phi = 0,6157$  respectivamente (Tabela 5).

TABELA 5 – ESTIMATIVAS DOS PARÂMETROS DO MODELO EXPONENCIAL PARA AS VARIÁVEIS DS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Variáveis	n° Obs.	$\beta$	$\tau^2 (C_0)$	$\sigma^2 (C_1)$	$\phi (a)$	DE%
Argila Superficial (%)	554	4,8161	0,0876	0,3607	0,5329	80,5
Argila Subsuperficial (%)	554	5,0725	0,0740	0,4362	0,6157	85,5
Horizonte A (cm)	554	40,4243	95,6302	153,5154	0,6653	61,6
Profundidade Efetiva (cm)	554	63,033	249,976	303,404	1,417	54,8

As variáveis espessura do horizonte “A” e profundidade efetiva apresentam moderada dependência espacial, com valores de DE% entre 75 e 25% com um alcance de até  $\phi = 0,6653$  e  $\phi = 1,417$  equivalentes a 1.996 m e 8.502 m respectivamente (Tabela 5).

Com os resultados obtidos através do ajuste do modelo exponencial foi possível produzir os mapas dos atributos físicos dos solos através de Krigagem Ordinária (Figura 6).

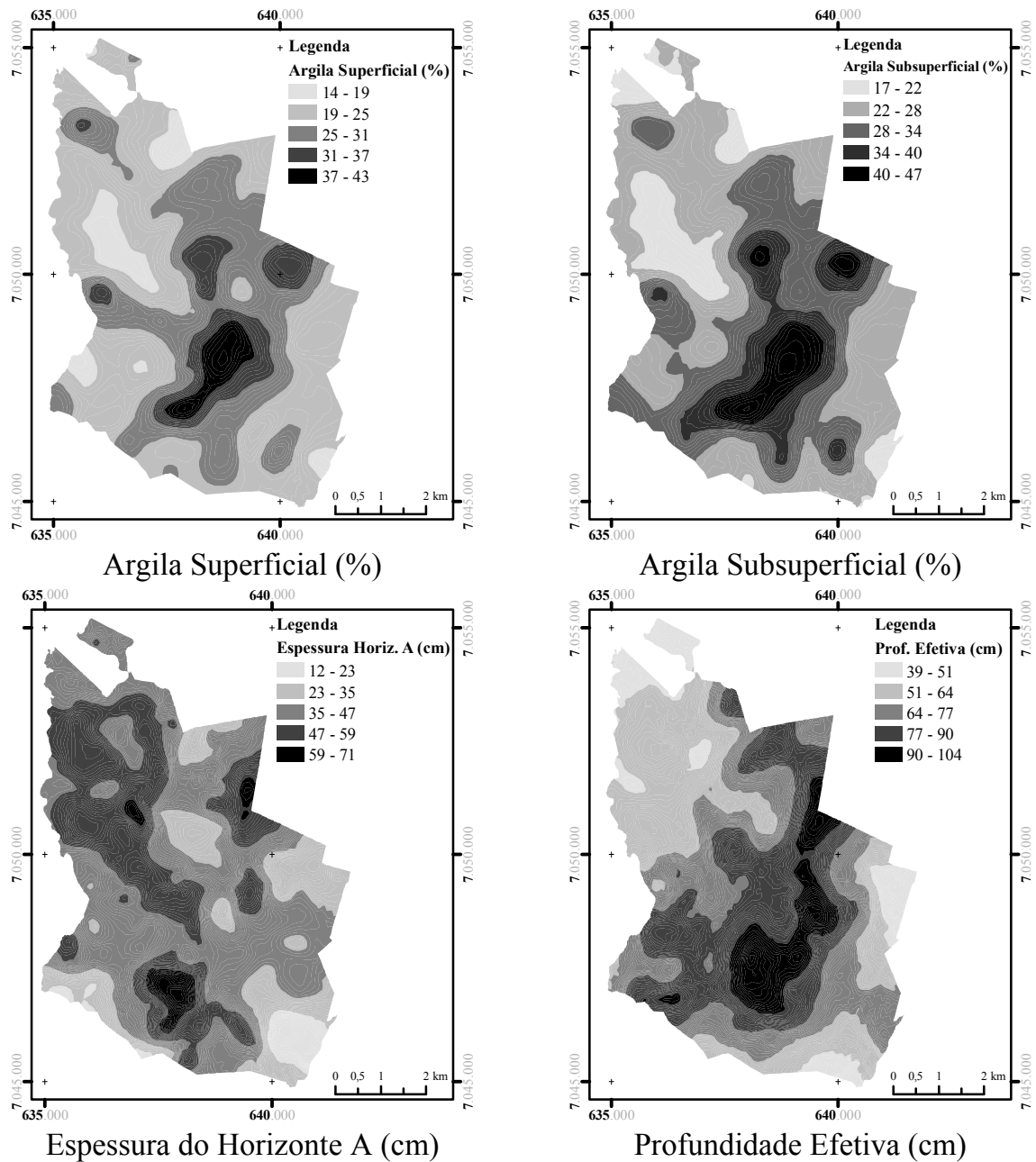


FIGURA 6 – ESPACIALIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO OBTIDOS ATRAVÉS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA

### 5.2.2 Declividade

A partir do modelo digital do terreno (Figura 7) foram geradas as classes de declividade (Tabela 6) utilizadas para a avaliação, sendo que os valores considerados na análise da fragilidade foram os valores de declividade em graus. O mapa de classes declividade pode ser observado na Figura 8.

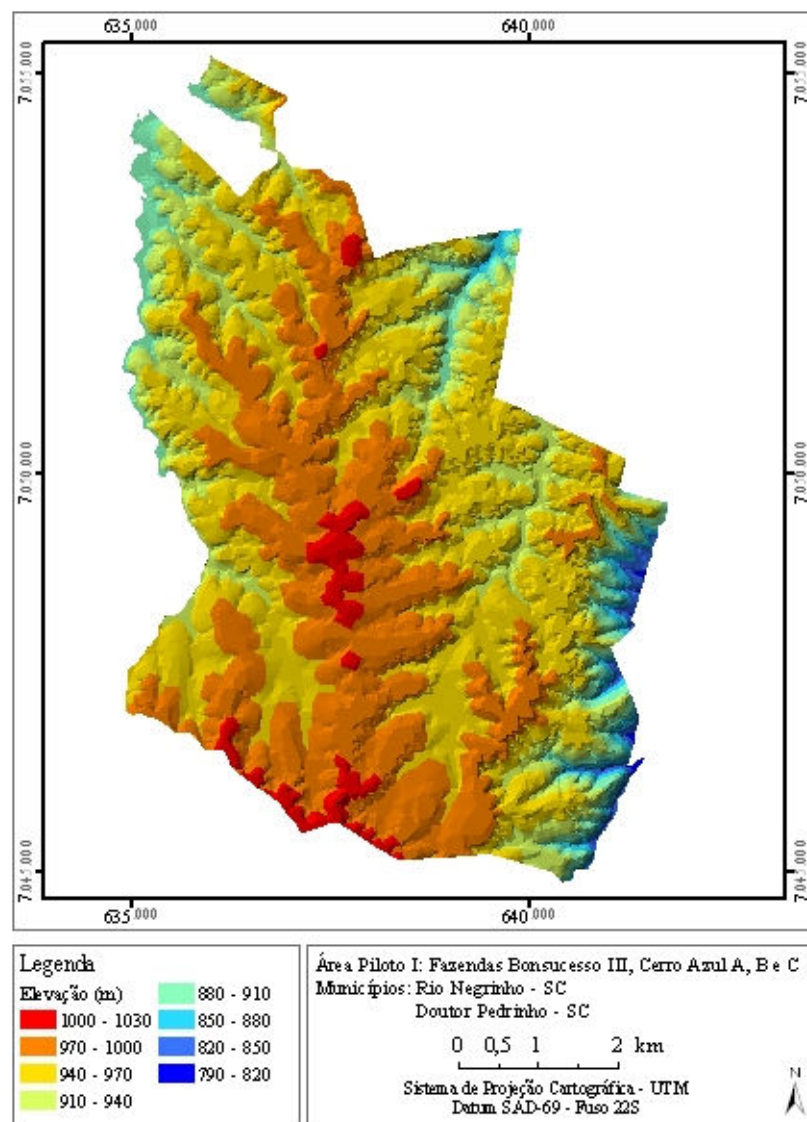


FIGURA 7 – MODELO DIGITAL DO TERRENO

TABELA 6 - CLASSES DE DECLIVIDADE

(%)	(°)	RELEVO
0 - 3	0 - 1,72	Plano
3 - 8	1,72 - 4,57	Suave ondulado
8 - 12	4,57 - 6,84	Ondulado 1
12 - 20	6,84 - 11,31	Ondulado 2
20 - 30	11,31 - 16,70	Forte ondulado 1
30 - 45	16,70 - 24,23	Forte ondulado 2
45 - 75	24,23 - 36,87	Montanhoso
75 - 100	36,87 - 45	Escarpado 1
>100	>45	Escarpado 2

Fonte: Adaptado de LEPSCH, 1991.



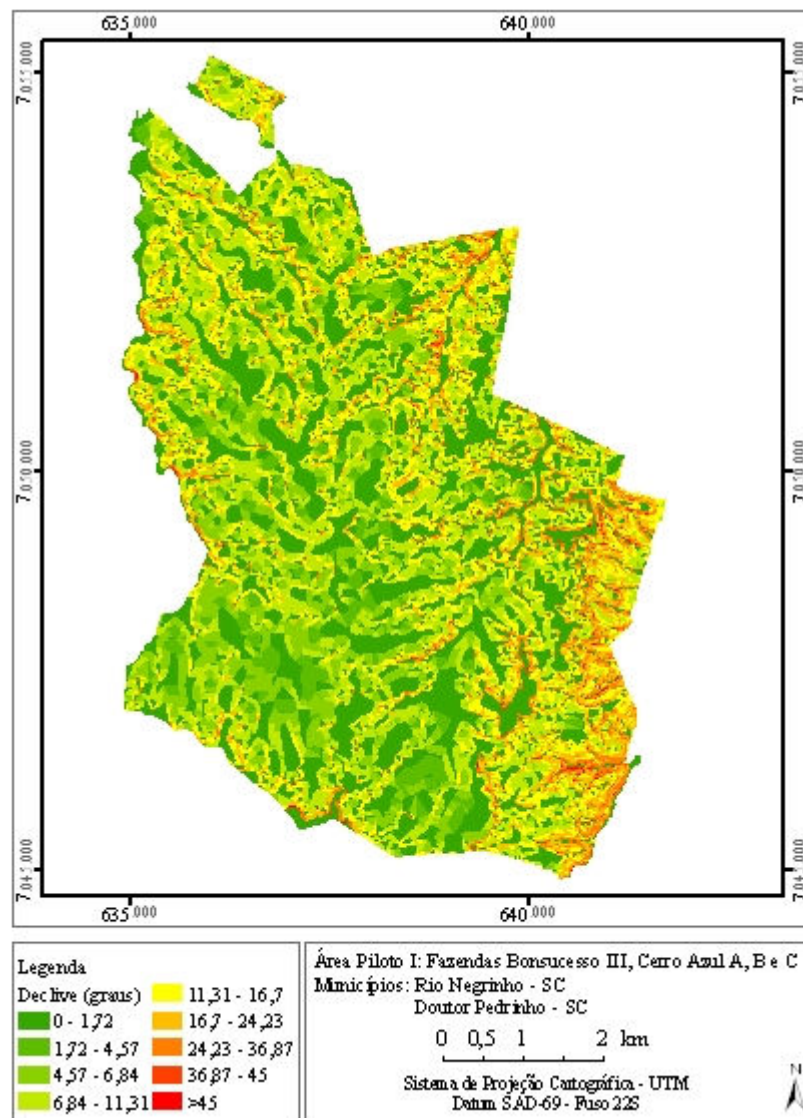


FIGURA 8 – MAPA DE CLASSES DE DECLIVIDADE EM GRAUS

### 5.3 ANÁLISE DA FRAGILIDADE AMBIENTAL

A rede de dependência elaborada no *NetWeaver* pode ser visualizada através do esquema gráfico da Figura 9, onde é possível observar a hierarquia dada pelas redes “fragilidade ambiental”, “estado” e “pressão”, bem como a suas relações com os *data links* através do operador *UNION* (U).

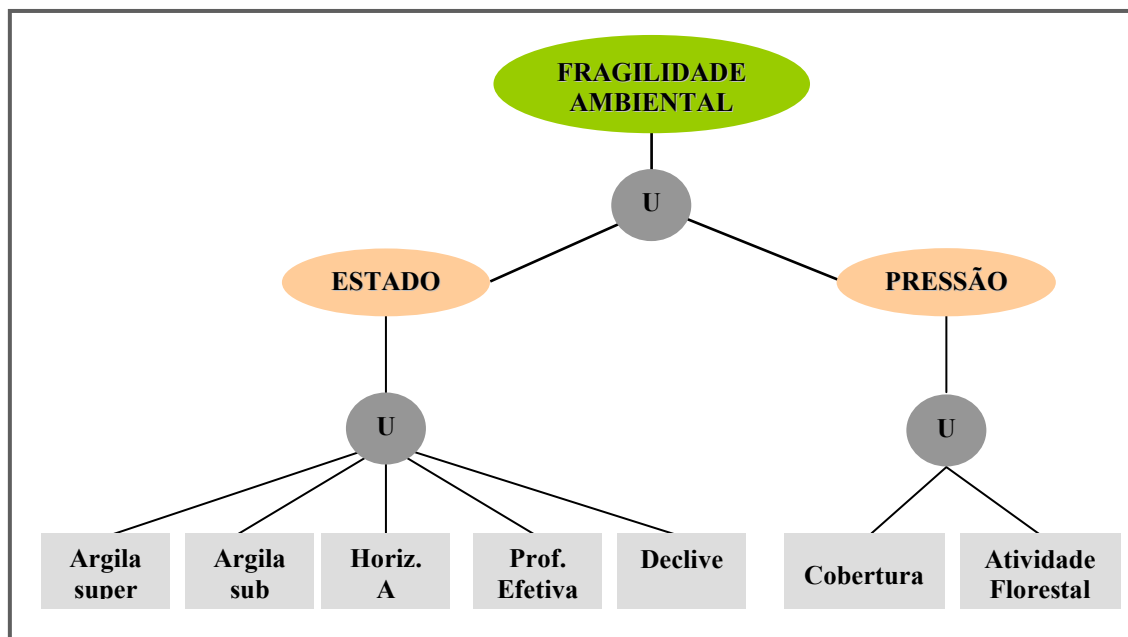


FIGURA 9 - ESQUEMA GRÁFICO DA REDE DE DEPENDÊNCIA ELABORADA NO PROGRAMA NETWEAVER

O argumento *fuzzy* de cada *data link* é dado através dos valores das funções de pertinência (Tabela 7), os quais foram embasados na literatura e na opinião de um especialista<sup>11</sup>.

TABELA 7 - DOMÍNIO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FUZZY DOS DADOS

DADOS	VALOR VERDADEIRO	VALOR FALSO
Argila da camada superficial (%)	60	15
Argila da camada subsuperficial (%)	60	15
Profundidade efetiva do solo (cm)	100	25
Profundidade do horizonte A (cm)	60	10
Declividade (°)	1,72	36,87
Cobertura	1	0
Atividade Florestal (pesos unitários)	4	11

Para representar a cobertura vegetal foram definidos arbitrariamente que áreas totalmente cobertas com floresta apresentam valor 1 (100%) e 0 (0%) para áreas sem qualquer cobertura vegetal (ver item 4.2.2). Já os valores para as atividades florestais correspondem ao valor mínimo e máximo que podem ser obtidos através da Matriz de Leopold.

<sup>11</sup> Itamar Antonio Bognola, comunicação pessoal

Os gráficos que representam as funções de pertinência dos *data links* podem ser observados na Figura 10.

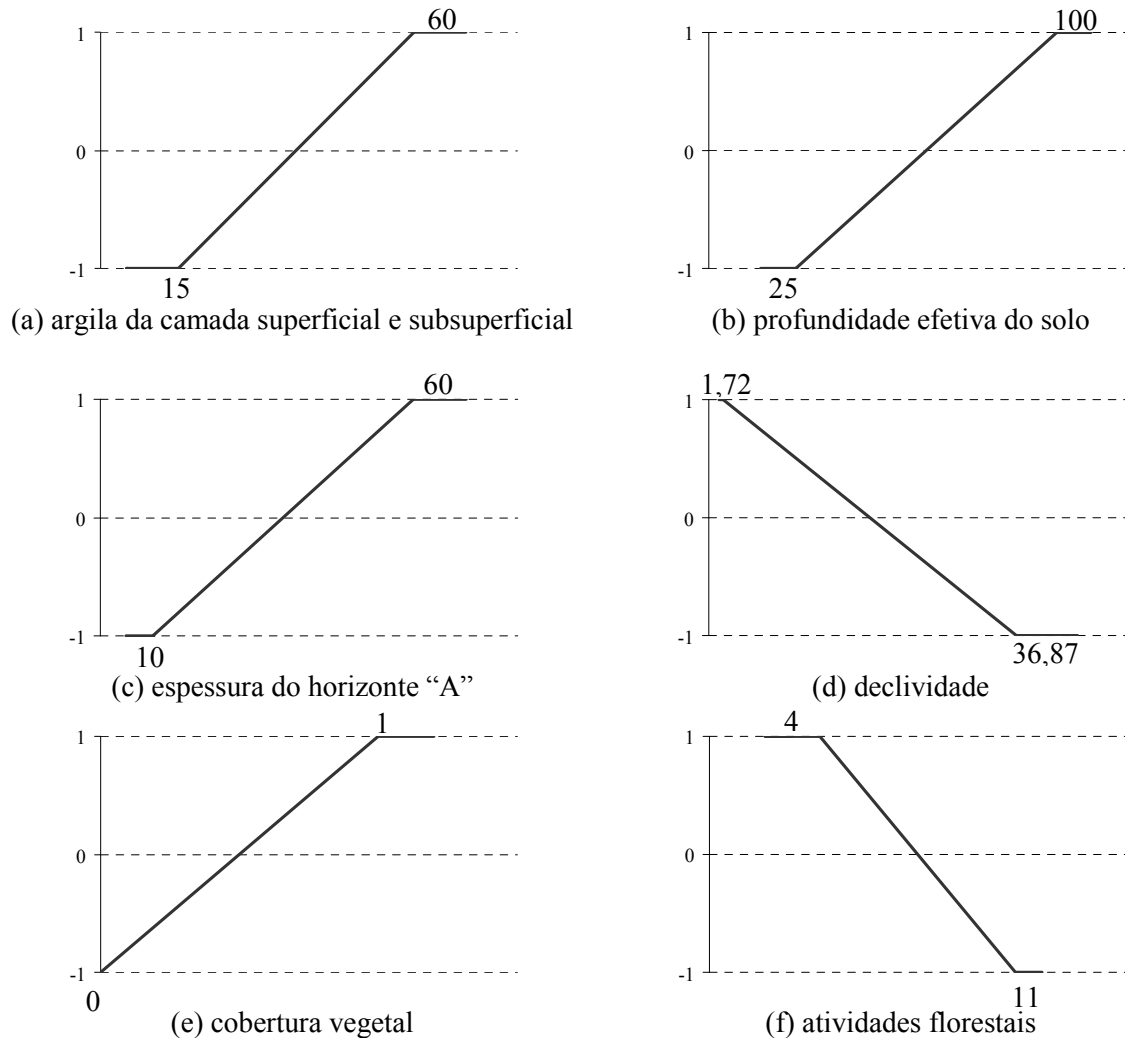


FIGURA 10 – GRÁFICOS DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA FUZZY PARA CADA UMA DAS VARIÁVEIS

Após a elaboração das redes de dependência e da atribuição dos valores da função de pertinência, procedeu-se à avaliação, realizada através da extensão EMDS no *ArcGIS*. Esta avaliação permitiu que cada rede de dependência elaborada (estado, pressão e fragilidade ambiental) pudesse ser visualizada na forma de mapa e analisada separadamente.

O mapa que representa a rede “estado” é constante, uma vez que mostra as características da fragilidade do solo no seu estado atual. Já para a rede “pressão” foram obtidos seis mapas, que correspondem à combinação dos valores “verdade” do

impacto das nove atividades florestais (listadas na Tabela 2) e dos valores “verdade” da cobertura vegetal. Pelo fato de algumas atividades possuírem o mesmo valor de impacto e, portanto, o mesmo valor “verdade”, foram obtidos seis mapas e não nove.

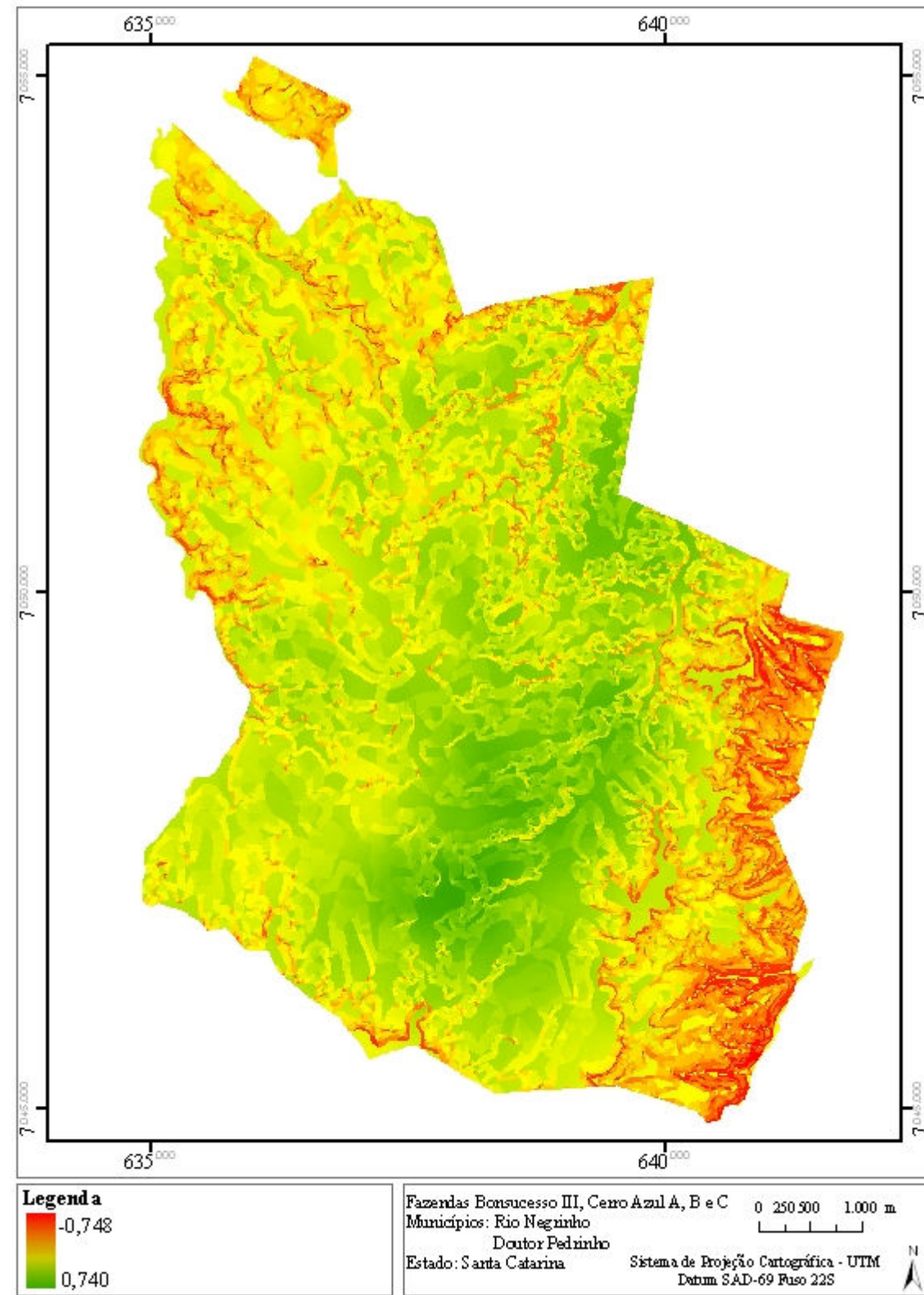
Para a rede “fragilidade ambiental” foram obtidos outros seis mapas, que são decorrentes da combinação do mapa de “estado” com cada um dos seis mapas de “pressão”, representando cenários do que ocorre com o “estado” quando determinada atividade impactante é realizada sobre ele.

### 5.3.1 Estado

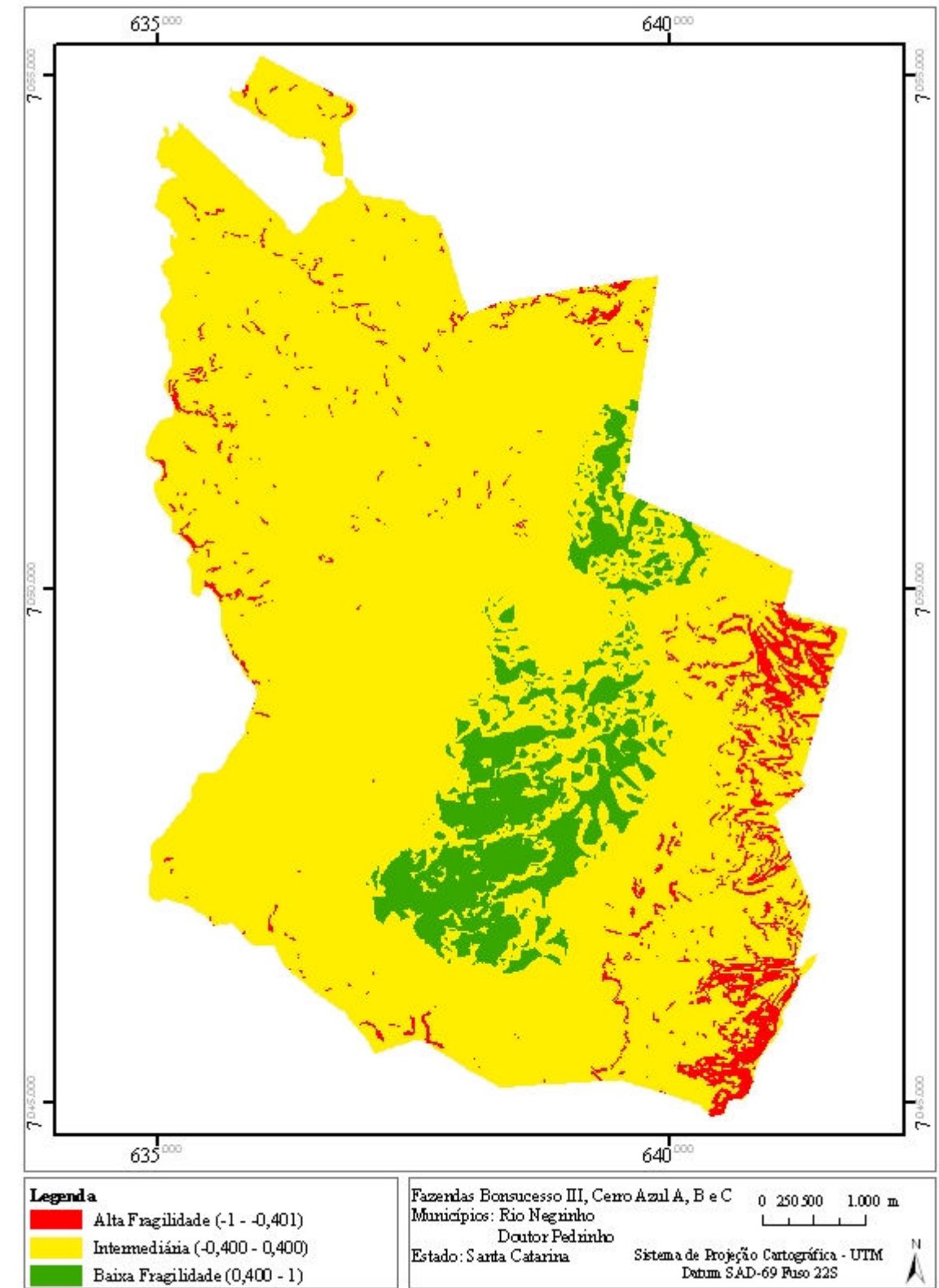
Os resultados da avaliação do mapa da rede “estado” mostram que os valores “verdade” de fragilidade variaram de -0,748 até 0,740, portanto não foram identificadas na área de estudo locais com valor “verdade” (-1) ou (1), isto porque não há locais que apresentem simultaneamente todos os valores falsos ou todos os valores verdadeiros respectivamente, da função de pertinência *fuzzy*.

O mapa de fragilidade para a rede “estado” pode ser visualizado na Figura 11a com todos os valores “verdade” alcançados e os mesmos divididos em três classes na Figura 11b. A divisão em três classes foi realizada de acordo com as funcionalidades das operações florestais, dada a inviabilidade de tratar cada área de forma diferenciada em um mapa com muitas classes. No entanto este mapa fornece informações sobre a fragilidade inerente às características de solo e declividade que podem auxiliar na tomada de decisões para planejamentos futuros que possam ocorrer, tais como alocação de estradas, de áreas para plantios ou reserva legal.

Desta forma, a primeira classe do mapa da rede estado abrange os menores valores “verdade”, até -0,401, ou seja, as áreas mais frágeis, representando 4,6 % da área de estudo. A segunda classe compreende a maior área, 86,4%, onde os valores “verdade” variam de -0,400 a 0,400. Já a terceira classe apresenta os valores “verdade” acima de 0,400 abrangendo 9% e representando as áreas menos frágeis. A primeira classe foi considerada como de “alta fragilidade”, a segunda de “fragilidade intermediária” e a terceira de “baixa fragilidade”.



(a)



(b)

FIGURA 11 – MAPA DE FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B)

A maior parte (77,5%) da área com alta fragilidade apresenta relevo com declividades maiores que 36,87° (equivalente a 75% de declividade), e o restante (22,5%) com declividade de 24,23° (Figura 12a). Nesta classe também são encontrados apenas solos com textura média (até 35% de argila) na camada superficial e 99,2% da área apresenta textura média na camada subsuperficial (Figura 12b). A espessura do horizonte “A” está entre 13 e 60 cm (Figura 12c) e a profundidade efetiva varia de 39 a 92 cm, ou seja, são solos rasos a moderadamente profundos, sendo que 78,4% possui mais de 50 cm (Figura 12d).

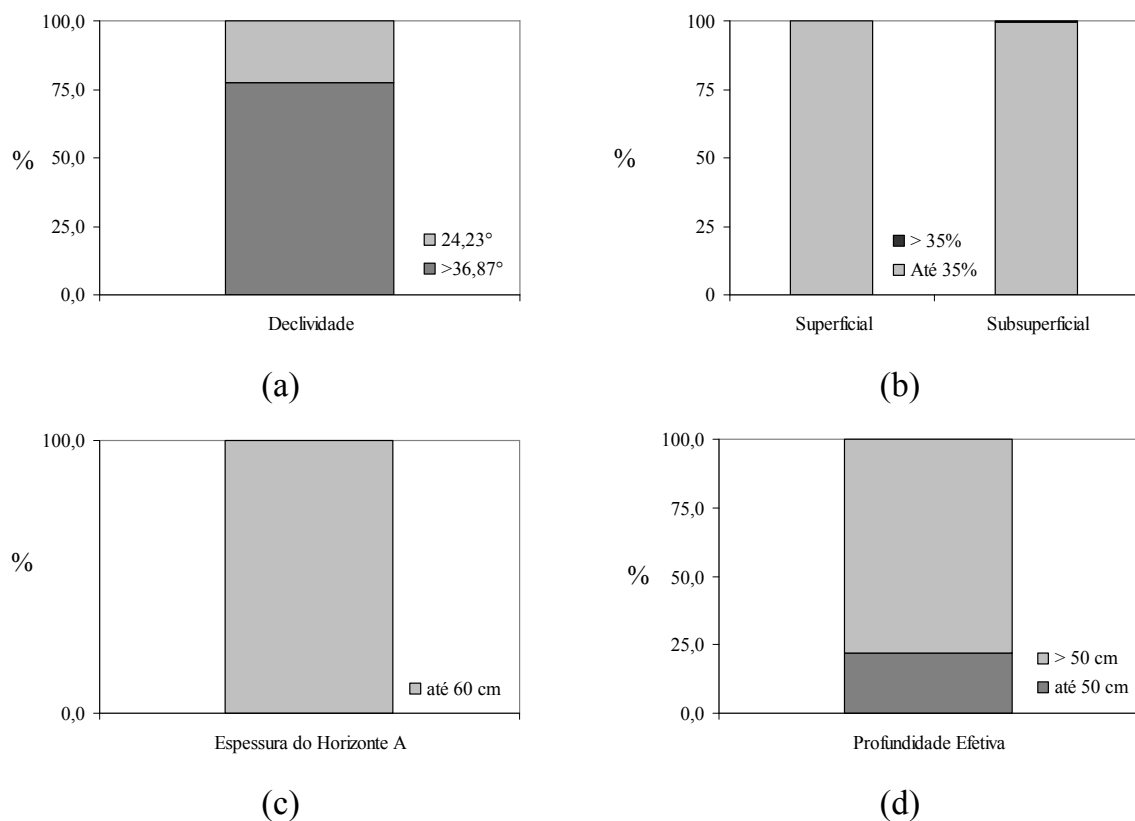


FIGURA 12 – CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A CLASSE DE ALTA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO

Os resultados obtidos mostram que a utilização do operador ‘UNION’ permite que uma variável com maior valor “verdade” compense outra variável com menor valor. No exemplo 7 (Tabela 8), observa-se que os maiores valores de espessura de horizonte “A” e de profundidade efetiva compensaram o relevo “montanhoso”

(declividade de 36,87°). Por outro lado no exemplo 8 (Tabela 8) com relevo “forte ondulado 2” (declividade de 24,23°) compensou a menor espessura de horizonte A, classificando assim o exemplo 7 e 8 em um mesmo nível de fragilidade (valor verdade igual a -0,401).

Nos outros exemplos (Tabela 8), verifica-se da mesma forma, que o valor “verdade” aumenta ou diminui conforme as combinações dos valores das variáveis, onde podemos verificar ainda que quando o valor “verdade” da declividade permanece constante (valores > que 36,87°, que correspondem ao valor “verdade” de -1), ora a textura eleva o valor “verdade” ora a espessura do horizonte “A” ou ainda a profundidade efetiva do solo.

TABELA 8 – EXEMPLOS DE LOCAIS PERTENCENTES À CLASSE DE ALTA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO

Ex.	Estado (valor “verdade”)	Argila Superficial (%)	Argila Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)
1	-0,748	19	21	16	54	45
2	-0,728	22	20	16	55	>45
3	-0,708	20	23	17	61	36,87
4	-0,690	19	19	17	65	36,87
5	-0,649	22	26	15	64	36,87
6	-0,579	21	25	36	59	45
7	-0,401	21	22	61	70	36,87
8	-0,401	21	22	18	67	24,23

Já na classe de fragilidade intermediária, estão incluídas todas as classes de declividade, sendo que a maior parte da área (70,5%) possui declives entre 4,57° e 24,23°; 28,3% com declividade de até 1,72° e, apenas 1,2% com declividade acima de 36,87° (Figura 13a). Em relação à textura do solo, 96,4% e 86,4% da área apresentam textura média para a camada superficial e para a camada subsuperficial, respectivamente (Figura 13b). A espessura do horizonte “A” é de até 60 cm (98,8% da área) e 89,3% da área apresenta profundidade efetiva entre 50 e 100 cm e apenas 0,4% acima de 100 cm, ou seja, a maior parte dos solos são moderadamente profundos, como podem ser visto nos gráficos das Figuras 13c e 13d.

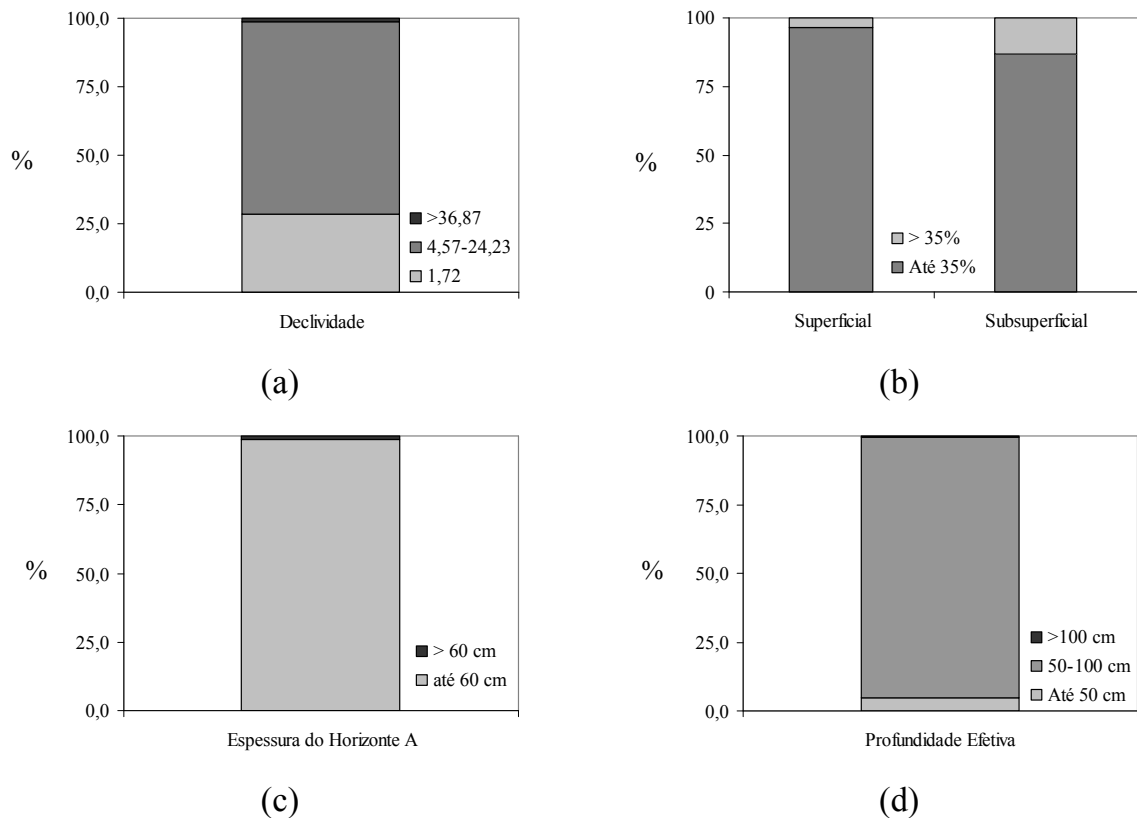


FIGURA 13 - CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A CLASSE DE FRAGILIDADE INTERMEDIÁRIA PARA A REDE ESTADO

A inclusão destas áreas na respectiva classe se deve ao maior peso que as variáveis declividade e textura da camada superficial estão proporcionando no modelo, indicando que mesmo que o solo possua menor erodibilidade, se este estiver em um relevo com elevada declividade ainda há um risco relevante de fragilidade, da mesma forma que um solo que apresenta textura mais arenosa e estiver localizado em relevo plano.

Alguns exemplos da Tabela 9 mostram exatamente isto, como no exemplo 5, onde se observa um relevo mais acentuado e um teor maior de argila e no exemplo 6 a declividade é menor e diminuem também os valores de argila.

Nos exemplos 2 e 8 (Tabela 9), verifica-se que não há diferença na declividade e nem na textura da camada superficial. No entanto a diferença textural da camada subsuperficial, da espessura do horizonte A e na profundidade efetiva, foi



suficiente para que o exemplo 8 atingisse um valor “verdade” maior.

TABELA 9 – EXEMPLOS DE LOCAIS PERTENCENTES À CLASSE INTERMEDIÁRIA DE FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO

Ex.	Estado (valor “verdade”)	Argila Superficial (%)	Argila Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)
1	-0,400	24	25	29	48	24,23
2	-0,400	34	37	29	64	36,87
3	-0,300	23	25	44	50	24,23
4	-0,300	31	34	46	74	36,87
5	-0,200	32	37	49	86	45
6	-0,200	19	21	47	54	16,7
7	-0,100	26	30	25	55	11,31
8	-0,100	34	43	49	97	36,87
9	0,100	30	35	39	86	16,7
10	0,100	24	28	31	58	1,72
11	0,200	27	30	44	56	1,72
12	0,200	39	43	46	100	24,23
13	0,300	29	36	40	71	1,72
14	0,300	30	32	54	91	11,31
15	0,400	30	37	38	89	1,72
16	0,400	39	46	43	93	11,31

Nesta classe também foram incluídas as áreas que atingiram o valor 0, ou seja, valor indeterminado, isto ocorre devido a questões operacionais do programa, pois o valor “verdade” varia de -1 a 1, portanto, em um dado momento, a reta pela qual a função de pertinência *fuzzy* é representada passa pelo valor 0. De acordo com MILLER e SAUNDERS (2002), este valor é também encontrado quando não há evidências nem a favor e nem contra a asserção que está sendo avaliada, ou ainda quando não há dados disponíveis ou dados inexistentes.

Na classe de baixa fragilidade, estão incluídas as áreas menos frágeis, ou com menor risco de degradação, onde 71,4% da área apresentam declividade de até 1,72° e o restante com declividade de até 16,7°, ou seja, até 30% de declive (Figura 14a). Já em relação à textura do solo, verifica-se que 55 % da área apresentam até 35% de argila na camada superficial e 80,5% apresentam mais que 35% de argila na camada subsuperficial (Figura 14b). No que diz respeito à profundidade do solo, observa-se que 78,9% apresenta até 60 cm de horizonte A (Figura 14c) e 89% possui profundidade efetiva de 50 a 100 cm e 11% acima de 100 cm (Figura 14d).

Em comparação com as outras classes, é possível constatar que na classe de baixa fragilidade não há áreas com declividades maiores que  $16,7^\circ$ , e nem de solos com profundidade efetiva menor que 50 cm. Verifica-se também que houve um acréscimo de áreas com teor de argila acima de 35%, com espessura de horizonte A maior que 60 cm e com profundidade efetiva maior que 100 cm, esta em relação à classe de fragilidade intermediária, visto que na primeira não houve a ocorrência de solos com mais de 100 cm de profundidade.

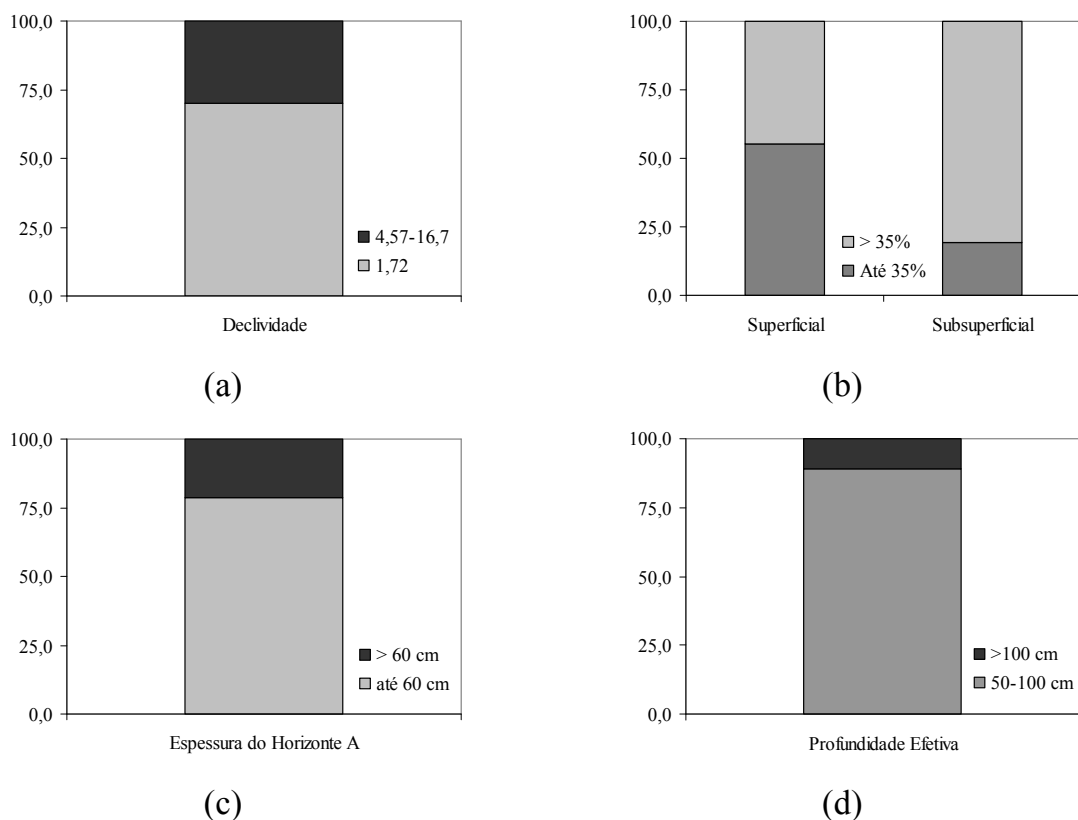


FIGURA 14 - CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA A CLASSE DE BAIXA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO

Em alguns exemplos da Tabela 10 pode-se verificar que, da mesma forma como ocorreu nas classes de alta fragilidade e de fragilidade intermediária, o operador *UNION* permite que um valor mais positivo de uma variável compense outro mais negativo, com certa hierarquia conforme os pesos que foram determinados para cada uma das variáveis.

TABELA 10 – EXEMPLOS DE LOCAIS PERTENCENTES À CLASSE DE BAIXA FRAGILIDADE PARA A REDE ESTADO

Ex.	Estado (valor “verdade”)	Argila Superficial (%)	Argila Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)
1	0,401	27	33	55	81	1,72
2	0,401	46	40	41	93	11,31
3	0,500	41	43	35	83	1,72
4	0,500	37	43	46	99	6,84
5	0,600	41	46	43	92	1,72
6	0,600	38	40	45	100	1,72
7	0,700	40	46	71	96	1,72
8	0,740	42	46	69	99	1,72

De uma forma geral, estes resultados permitem elucidar que na classe de alta fragilidade estão incluídas as áreas mais vulneráveis a degradação, sobretudo por apresentarem simultaneamente declividades mais acentuadas e solos com textura média. Já a classe intermediária de fragilidade diz respeito às áreas que apresentam uma combinação de solos mais estáveis com declividade acentuada ou solos mais instáveis e declividade mais suave. A classe de baixa fragilidade representa áreas mais estáveis ambientalmente e com menor risco de degradação.

### 5.3.2 Pressão

De acordo com a função de pertinência *fuzzy* os valores de impacto das atividades florestais, e da cobertura vegetal correspondem a um determinado valor “verdade” (Tabela 11) gerado durante a avaliação.

TABELA 11 – VALOR “VERDADE” CORRESPONDENTE AOS VALORES DE IMPACTO DAS ATIVIDADES FLORESTAIS E DA COBERTURA FLORESTAL

	Pressão	Valor	Valor “verdade”
Atividades Florestais	Preparo do solo mecanizado	8	-0,143
	Preparo do solo manual	5	0,714
	Marcação mecanizada	8	-0,143
	Marcação manual	5	0,714
	Manutenção mecanizada	6	0,429
	Manutenção manual	4	1
	Colheita motosserra/TC	7	0,143
	Colheita Feller/Skidder	8	-0,143
	Manutenção de estradas	8	-0,143
Cobertura Florestal	Com cobertura	1	1
	Com alguma cobertura (indeterminada)	0,5	0
	Sem cobertura	0	-1

Neste estudo considerou-se que todas as atividades realizadas dentro dos talhões ocorrem em áreas que apresentam alguma cobertura vegetal. No entanto, o valor que representaria a porcentagem de cobertura não foi apurado, assim determinou-se arbitrariamente o valor 0,5 correspondente ao valor “verdade” indeterminado, ou seja, 0 (Tabela 11) para representar a cobertura vegetal para as áreas onde são realizadas as atividades dentro dos talhões. Já para a atividade de manutenção das estradas, que não apresentam nenhuma proteção proporcionada pela cobertura vegetal, determinou-se o valor 0, correspondente ao valor “verdade” -1.

Algumas combinações geram o mesmo valor “verdade”, pois além de apresentar o mesmo valor de impacto, apresentam também o mesmo valor de cobertura. Assim os valores “verdade” que podem ser atingidos acabam se repetindo e podem ser sumarizados em apenas seis valores (Tabela 12), ou seja, seis cenários que exercem diferentes pressões no estado.

TABELA 12 – VALOR “VERDADE” RESULTANTE DA REDE PRESSÃO

Atividade Florestal (Valor de impacto)	Cobertura Vegetal	Pressão (Valor “verdade”)
Manutenção manual (4)	0,5	0,500
Preparo do solo e marcação manuaais (5)	0,5	0,357
Manutenção mecanizada (6)	0,5	0,214
Colheita motosserra/TC (7)	0,5	0,071
Colheita Feller/Skidder; preparo do solo mecanizado; Marcação mecanizada (8)	0,5	-0,071
Manutenção das estradas (8)	0	-0,571

De acordo com os dados da Tabela 12, é possível verificar que os valores “verdade” para a rede “pressão” variam de 0,500 a -0,571, diminuindo à medida que o valor de impacto das atividades aumenta e atingindo o mínimo valor quando se considera valor nulo de cobertura vegetal (manutenção das estradas). No entanto, o valor “verdade” da rede “pressão” é subestimado por não ter sido mensurada a cobertura vegetal.

Segundo a divisão dos valores “verdade” em três classes, utilizada para o mapa da rede “estado”, a manutenção de estradas enquadra-se na classe de alta fragilidade, ou seja, a classe que exerce a maior pressão no estado. As atividades de

preparo do solo, a de marcação manuais ou mecanizados, manutenção mecanizada e de colheita, enquadram-se na classe intermediária de fragilidade para a rede “pressão”. As atividades com valor de impacto igual a 4, ou seja a manutenção manual enquadram-se na classe de baixa fragilidade, ou seja, caracterizada no mapa como as áreas que exercem menor pressão.

Considerando as atividades mecanizadas é importante ressaltar que o impacto causado nestas áreas é minimizado pela proteção que a regeneração de gramíneas e pioneiras, de acículas e de restos de colheita (no caso do preparo do solo), proporciona ao solo, justificando, desta forma, os valores intermediários de impacto.

A proteção do solo pela cobertura vegetal (viva ou morta) é uns dos princípios básicos da conservação do solo sobre as terras agrícolas: quanto maior a cobertura vegetal, tanto menor será a perda de solo por erosão, pois a mesma diminui a ação erosiva do impacto direto das gotas de chuva sobre o solo, evita a formação de selos superficiais, aumenta a infiltração de água e diminui o escoamento superficial (FAVARETTO *et al.*, 2006b). TROEH *et al.* (1999) citam que uma cobertura superficial no solo com resíduo cultural de 30% já pode ser considerado como um preparo de solo conservacionista.

Os métodos de preparo do solo utilizados em áreas florestais no Brasil podem causar um amplo revolvimento das camadas superficiais do solo (preparo convencional com aração e gradagem) ou não, como no caso do cultivo mínimo, onde o preparo é realizado apenas na linha do plantio e os resíduos da extração são deixados no terreno minimizando o impacto da água da chuva. Este último método tem ocupado lugar de destaque no setor florestal, pois garante melhor conservação do solo e de suas propriedades (GONÇALVES e STAPE, 2002; MARTINS *et al.*, 2003; BRITO, 2004; PIRES, 2004; MARTINS, 2005).

Na atividade considerada como a de maior impacto (manutenção das estradas) há um maior revolvimento do solo ocasionado pela atividade intensa dos tratores, e/ou caminhões. Dentro deste contexto, com a aplicação de técnicas

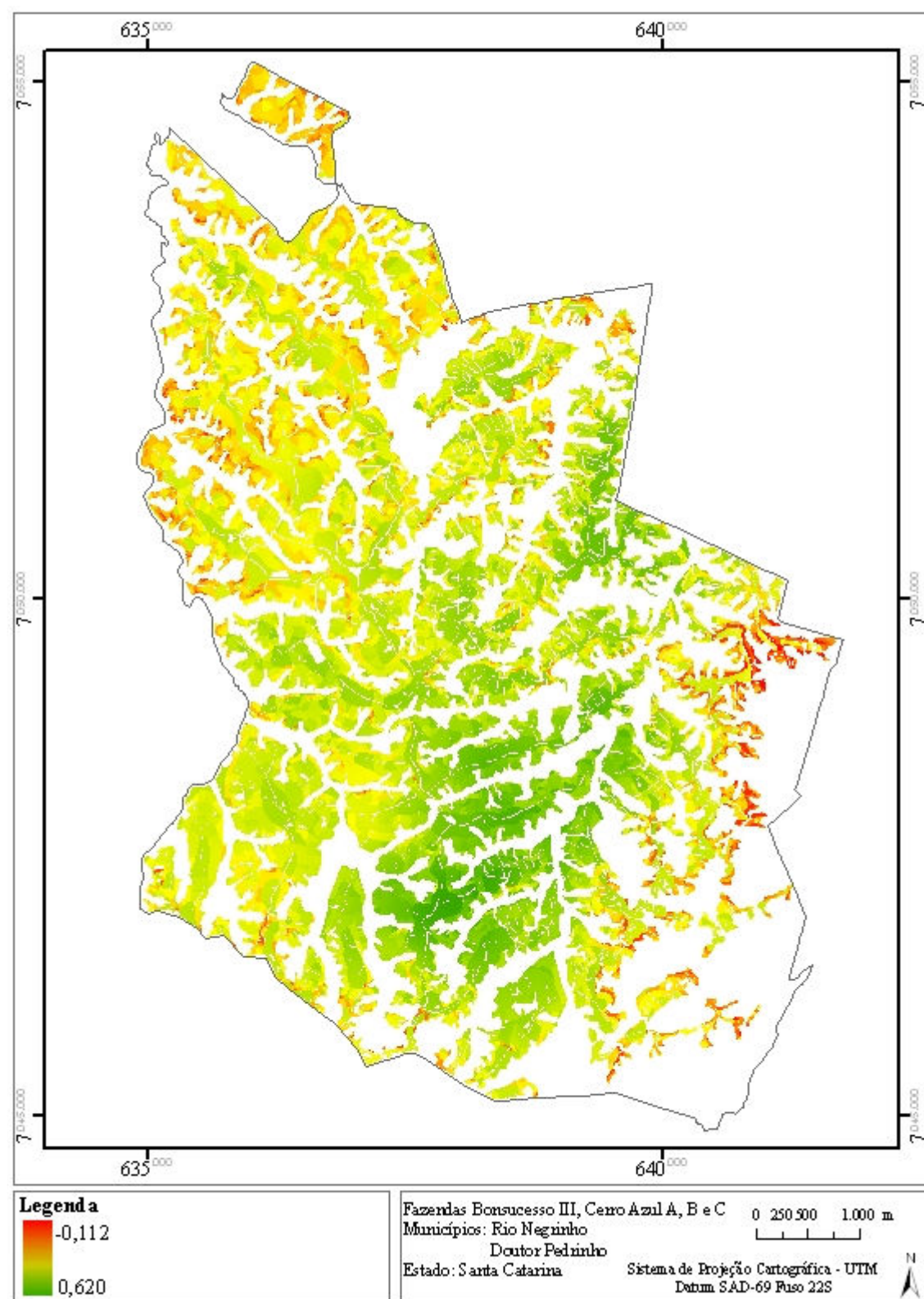
adequadas, o impacto de uma atividade pode ser muito minimizado. WORRELL e HAMPSON (1997) citam que em sítios mais susceptíveis à degradação, se aplicado um manejo menos intensivo, o impacto no solo é baixo o suficiente para que a exploração seja considerada como sustentável.

### 5.3.3 Fragilidade Ambiental em relação às atividades florestais

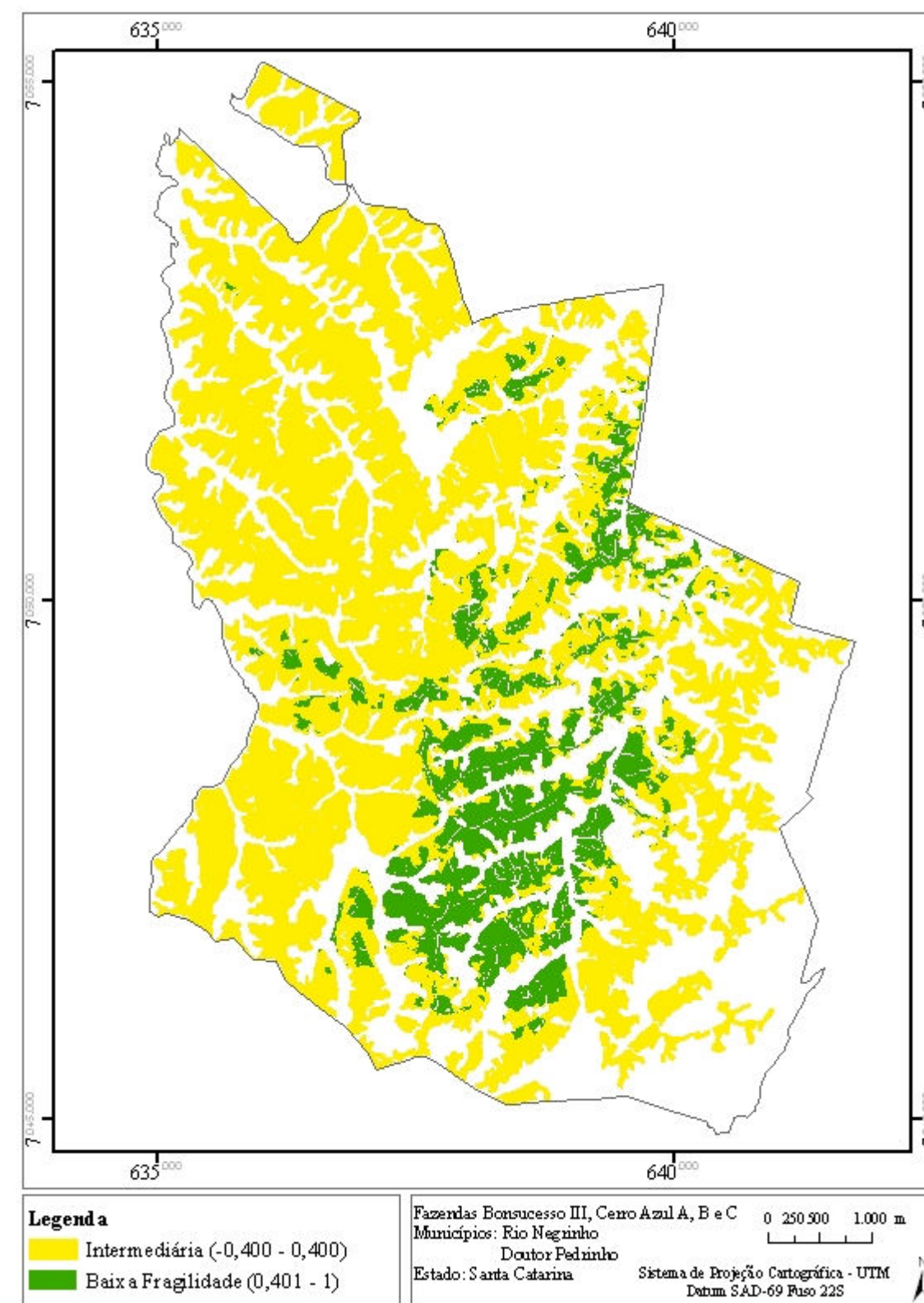
A combinação (dada através do operador *UNION*) dos valores “verdade” do mapa da rede “estado” com os valores do mapa da rede “pressão” originam os valores “verdade” para a “fragilidade ambiental” em relação às atividades florestais. Conforme comentado anteriormente, cada combinação fornece um cenário de fragilidade ambiental quando uma determinada “pressão” é exercida sobre um ambiente. No entanto, a fragilidade em relação ao grupo “estado” (tratada no item 5.3.1) é constante, uma vez que os atributos físicos dos solos e a declividade não se alteram com a “pressão”. Portanto, o mapa de fragilidade ambiental em relação às atividades florestais representa uma simulação de fragilidade ambiental condicionada a um determinado uso.

Desta forma, são apresentados cinco cenários correspondentes às atividades realizadas dentro do talhão e um cenário correspondente à manutenção das estradas, que é realizada fora do talhão. Assim, a avaliação da fragilidade ambiental ocorre somente em áreas com plantios florestais e nas estradas.

- **Manutenção manual:** Este cenário diz respeito à atividade de manutenção manual com valor de impacto igual a 4, (Tabela 2, p.21) e em solo com alguma cobertura vegetal (Tabela 11, p. 49 e Tabela 12, p.50). Os valores “verdade” para a fragilidade ambiental deste cenário variaram de -0,112 a 0,620, sendo que 78% da área de plantio estão incluídas na classe intermediária de fragilidade (-0,400 a 0,400) e 22% na classe de baixa de fragilidade (0,401 a 1). Na Figura 15a pode ser visualizado o mapa com todos os valores alcançados e na Figura 15b os valores classificados.



(a)



(b)

FIGURA 15 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO MANUAL E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B)

Na área classificada como de fragilidade ambiental intermediária, verifica-se que 1,6% desta apresentam alta fragilidade para a rede “estado”, ou seja, houve um acréscimo do valor “verdade” nestas áreas, e portanto uma diminuição da fragilidade ambiental em relação a fragilidade apresentada para a rede “estado”. O mesmo ocorreu para a classe de fragilidade ambiental baixa, onde há 11% da área com fragilidade intermediária para a rede “estado”.

TABELA 13 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 4 E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL

Ex.	Arg. Superficial (%)	Arg. Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Pressão (valor “verdade”)	Fragilidade (valor “verdade”)
1	19	20	17	58	36,87	-0,724	0,5	-0,112
2	23	25	39	59	24,23	-0,299	0,5	0,100
3	24	22	41	48	11,31	-0,100	0,5	0,200
4	30	35	39	86	16,7	0,100	0,5	0,300
5	30	30	55	57	1,71	0,300	0,5	0,400
6	33	37	49	90	1,72	0,500	0,5	0,500
7	42	46	69	99	1,72	0,740	0,5	0,620

De acordo com alguns exemplos citados na Tabela 13, pode-se observar de um modo geral que o fato de existir a variável cobertura vegetal aliada a uma atividade de menor impacto (valor “verdade” igual a 0,5), ocasionou um aumento no valor “verdade” assim como pode ser visto nos exemplos de 1 a 5, e para áreas com valores “verdade” acima de 0,500, apesar de ainda estar na mesma classe de fragilidade, este aumento não acontece mais. Isto ocorre porque quando o operador *UNION* combina os dois valores é realizada uma média ponderada e como o valor “verdade” da pressão é igual ou menor ao valor “verdade” da rede “estado”, o acréscimo não ocorre, mas sim um decréscimo.

Neste caso, sabe-se que o valor “verdade” considerado para a variável cobertura vegetal é indeterminado. No entanto é importante ressaltar que existe alguma cobertura vegetal e embora não esteja sendo considerada neste modelo, ela auxilia na proteção do solo. No caso desta atividade específica (manutenção manual) onde são realizadas as operações de roçada, há um aumento da cobertura de material vegetal morta sobre o solo. De acordo com LOURENÇO e MEDRADO (1998) a cobertura do



solo com restos de cultura, ou de roçada é uma das mais eficientes práticas de controle da erosão, inclusive a eólica. Ela protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, evitando a desagregação das partículas (primeiro estágio da erosão) e diminui o escoamento superficial, mitigando o transporte das partículas desagregadas (segundo estágio da erosão). No caso da erosão eólica, a cobertura morta protege o solo contra a ação direta dos ventos, impedindo o transporte das partículas.

- **Preparo do solo e marcação manuais:** Neste cenário simula-se a atividade florestal com valor de impacto igual a 5 em áreas onde há alguma cobertura vegetal, proporcionada pelos restos de colheita e também pela regeneração de gramíneas e pioneiras.

O mapa de valores “verdade” para este cenário pode ser observado na Figura 16a e na Figura 16b (classificado), onde se observa 92% da área de plantio na classe intermediária de fragilidade (-0,400 a 0,400) com valores “verdade” que variaram de -0,183 a 0,400, e 8% na classe baixa fragilidade (0,401 a 1), com valores de 0,401 a 0,548.

Da mesma forma que no cenário anterior, verifica-se que na classe intermediária de fragilidade ambiental há 1,6% da área de plantio com alta fragilidade para a rede “estado”, ou seja, houve um acréscimo no valor “verdade” destas áreas, justificado novamente pela presença da variável cobertura vegetal. Nesta classe também foi observado que 3% apresentam fragilidade “estado” baixa, ou seja, neste caso houve um decréscimo do valor “verdade”. Este evento justifica-se pelo fato de que o valor “verdade” da rede pressão (0,357 - ver Tabela 12) não foi suficiente para elevar o valor “verdade” da fragilidade ambiental dado o impacto proporcionado pelas atividades de preparo do solo manual e marcação manual em um local com alguma cobertura vegetal.

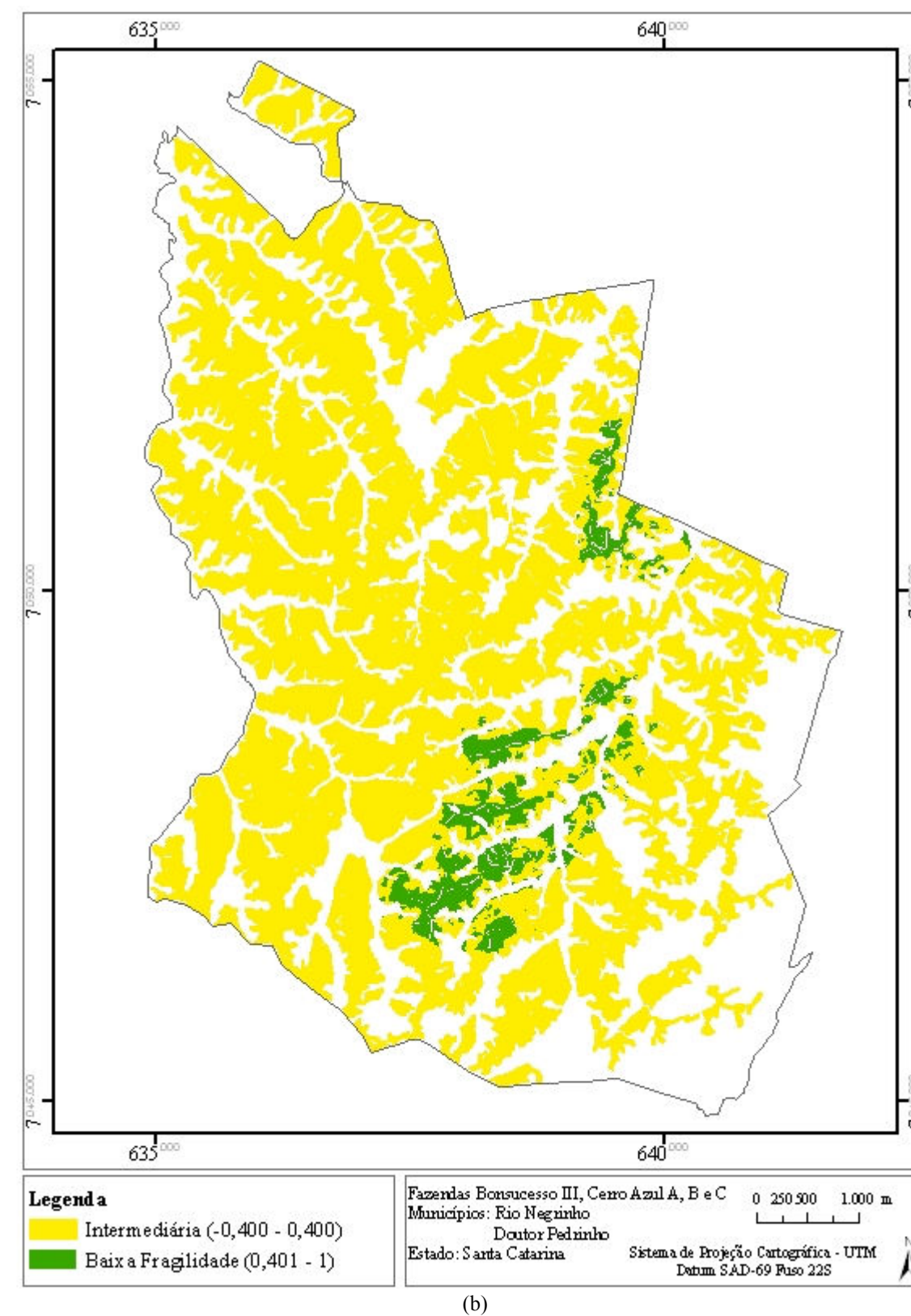
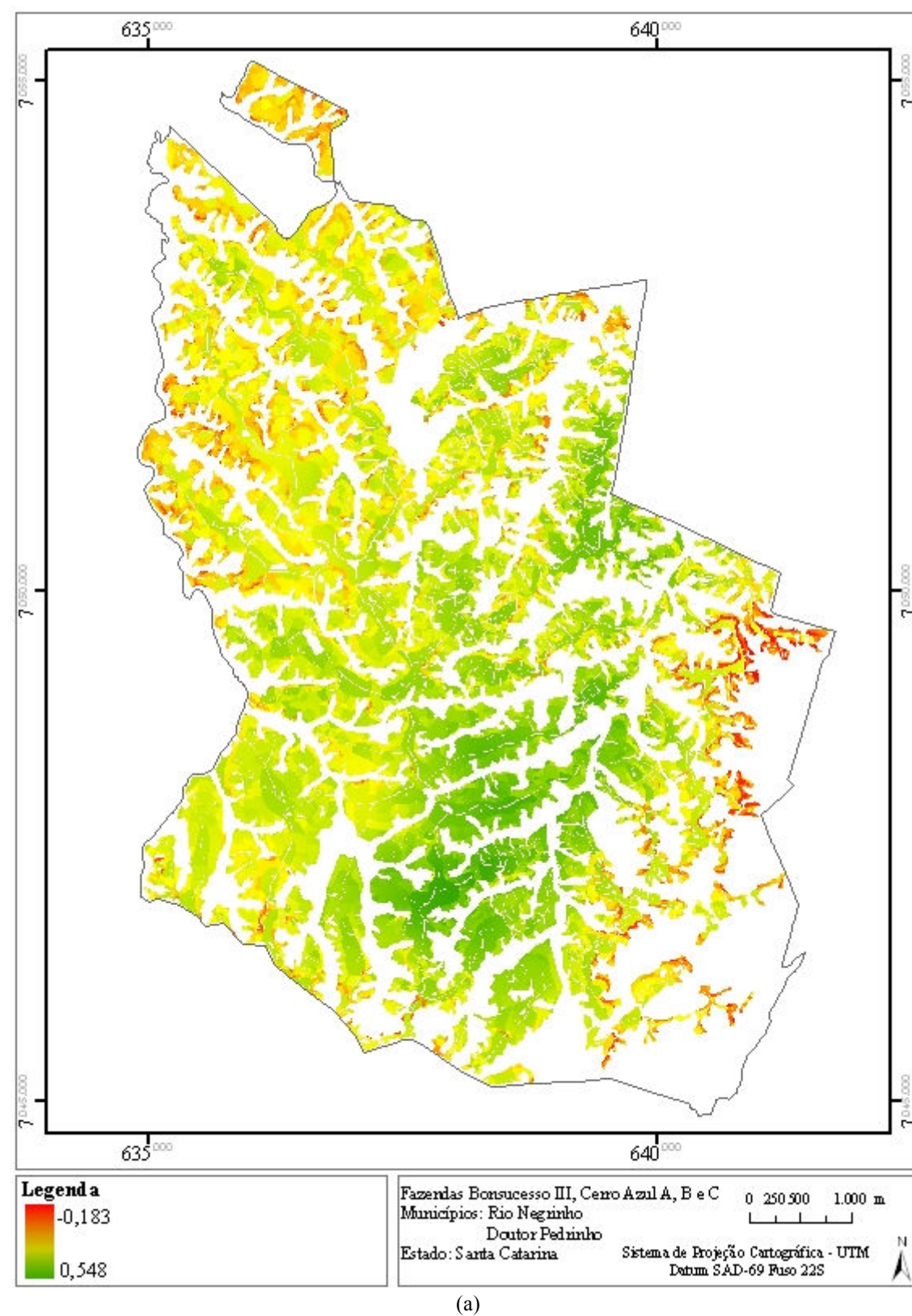


FIGURA 16 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DAS ATIVIDADES DE PREPARO DO SOLO MANUAL, MARCAÇÃO E PLANTIO MANUAIS, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) CLASSIFICADO (B)

Na tabela 14 podem ser visualizados alguns exemplos deste cenário, onde pode-se perceber o acréscimo no valor “verdade” em relação a rede “estado” para os exemplos de 1 a 5, e o decréscimo nos exemplos 6 e 7 com valores maior ou igual a 0,500.

TABELA 14 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 5, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL

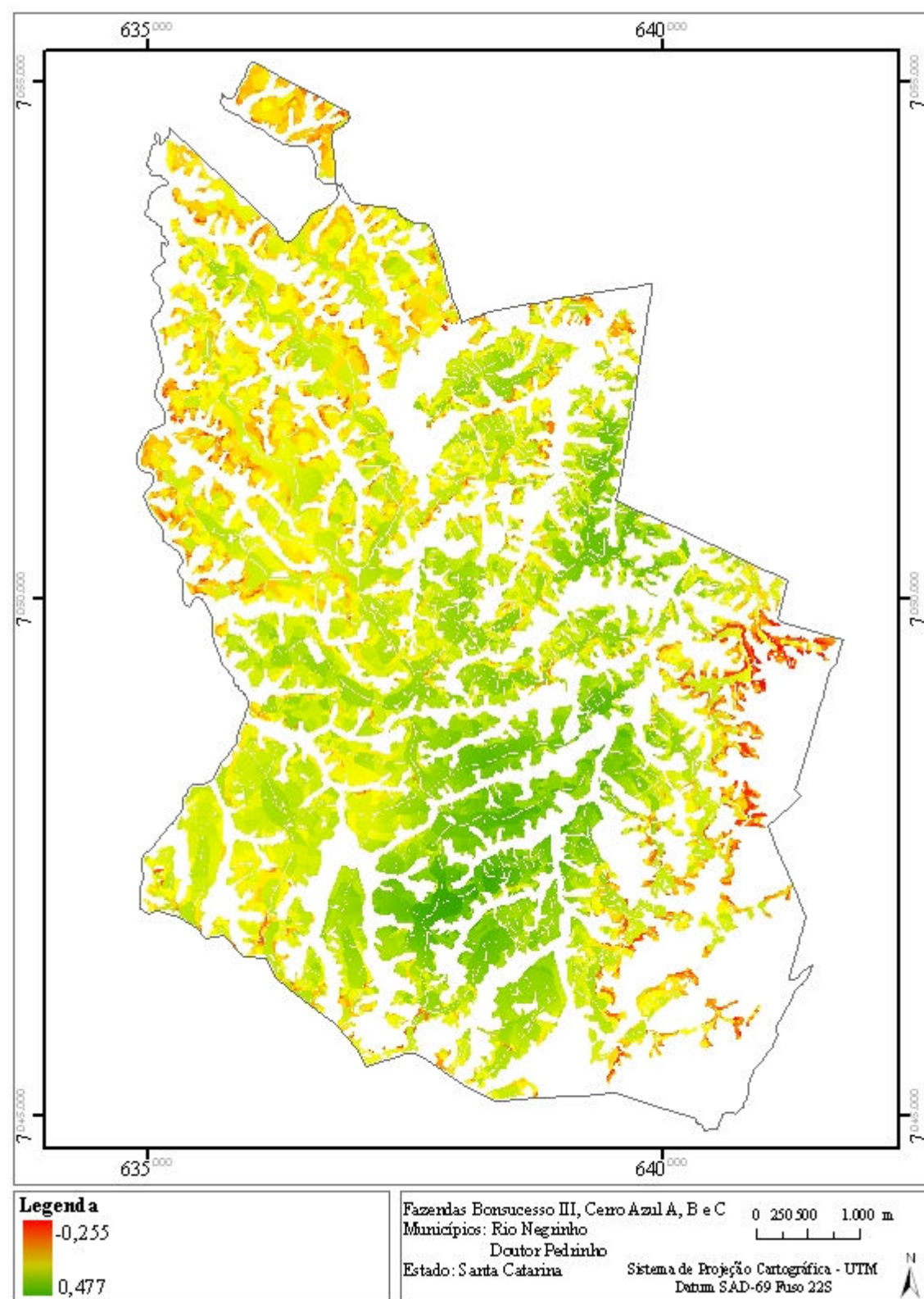
Ex.	Arg. Superficial (%)	Arg. Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Pressão (valor “verdade”)	Fragilidade (valor “verdade”)
1	19	20	17	58	36,87	-0,724	0,357	-0,183
2	23	25	39	59	24,23	-0,299	0,357	0,029
3	24	22	41	48	11,31	-0,100	0,357	0,129
4	30	35	39	86	16,7	0,100	0,357	0,228
5	30	30	55	57	1,71	0,300	0,357	0,328
6	33	37	49	90	1,72	0,500	0,357	0,428
7	42	46	69	99	1,72	0,740	0,357	0,548

- **Manutenção mecanizada:** Neste cenário simula-se uma atividade com valor de impacto igual a 6 sobre um solo com alguma cobertura vegetal, onde são encontrados 98,6% da área de plantio na classe intermediária de fragilidade e 1,4% na classe de baixa fragilidade, sendo que a amplitude dos valores “verdade” foi de -0,255 a 0,400 e de 0,401 a 0,477, respectivamente.

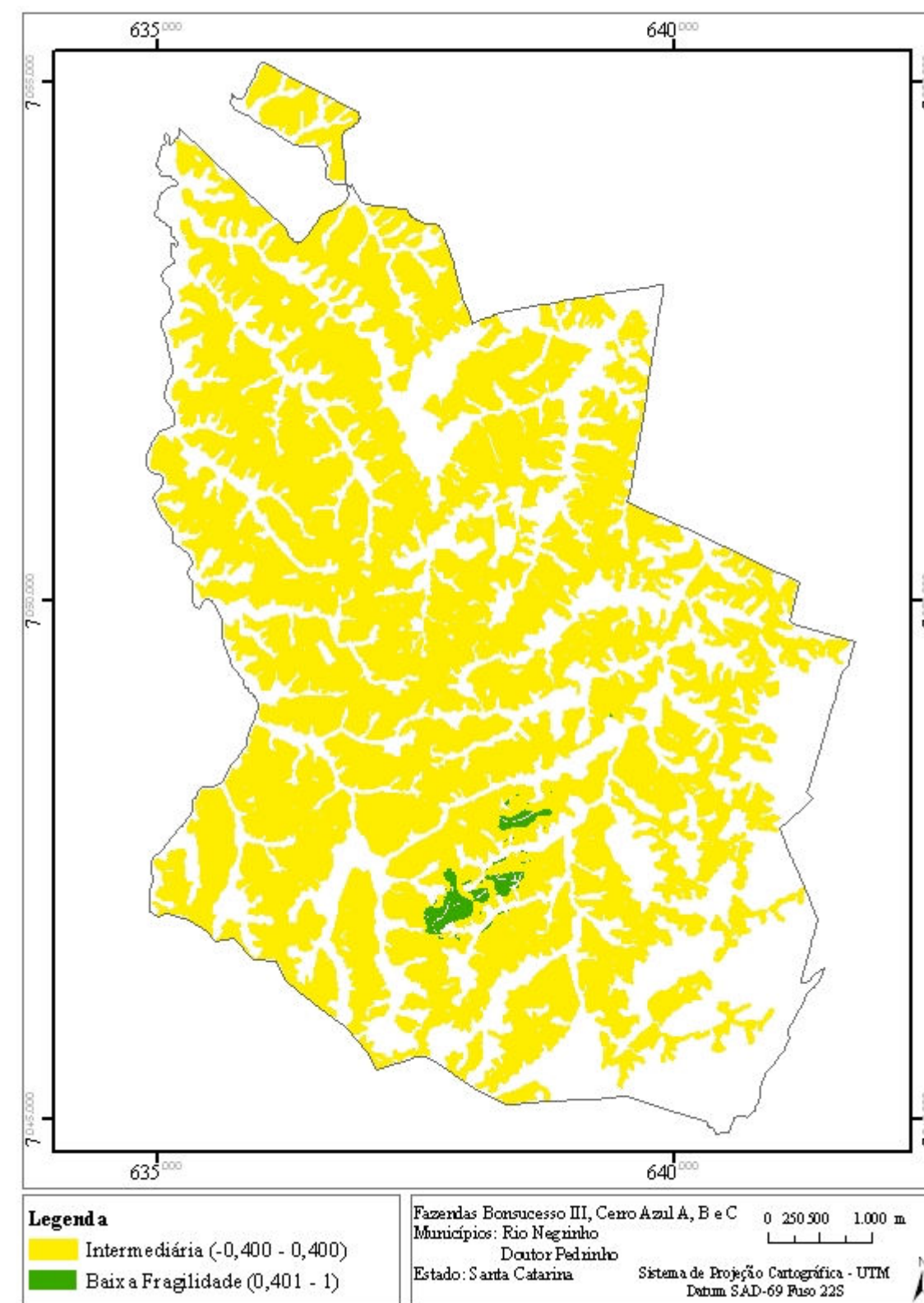
No referido cenário verifica-se que toda a área (1,6%) com alta fragilidade na rede “estado”, assim como 9,6% da área de fragilidade “estado” baixa foram incluídas na classe de fragilidade ambiental intermediária, ou seja, da mesma forma que para o cenário anterior houve um acréscimo e um decréscimo, respectivamente, dos valores “verdade” para estas áreas.

Na Figura 17, podem ser observados os mapas com todos os valores “verdade” alcançados (a) e com os valores classificados (b).





(a)



(b)

FIGURA 17 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO MECANIZADA E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B)

De acordo com os exemplos da Tabela 15, observa-se que com o aumento do impacto da atividade florestal e conseqüentemente a diminuição do valor “verdade” da rede “pressão” faz com que haja decréscimo do valor “verdade” para locais com valor “verdade” igual ou maior que 0,300 (exemplos 5, 6 e 7).

TABELA 15 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 6, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL

Ex.	Arg. Superficial (%)	Arg. Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Pressão (valor “verdade”)	Fragilidade (valor “verdade”)
1	19	20	17	58	36,87	-0,724	0,214	-0,255
2	23	25	39	59	24,23	-0,299	0,214	-0,043
3	24	22	41	48	11,31	-0,100	0,214	0,057
4	30	35	39	86	16,7	0,100	0,214	0,157
5	30	30	55	57	1,71	0,300	0,214	0,257
6	33	37	49	90	1,72	0,500	0,214	0,357
7	42	46	69	99	1,72	0,740	0,214	0,477

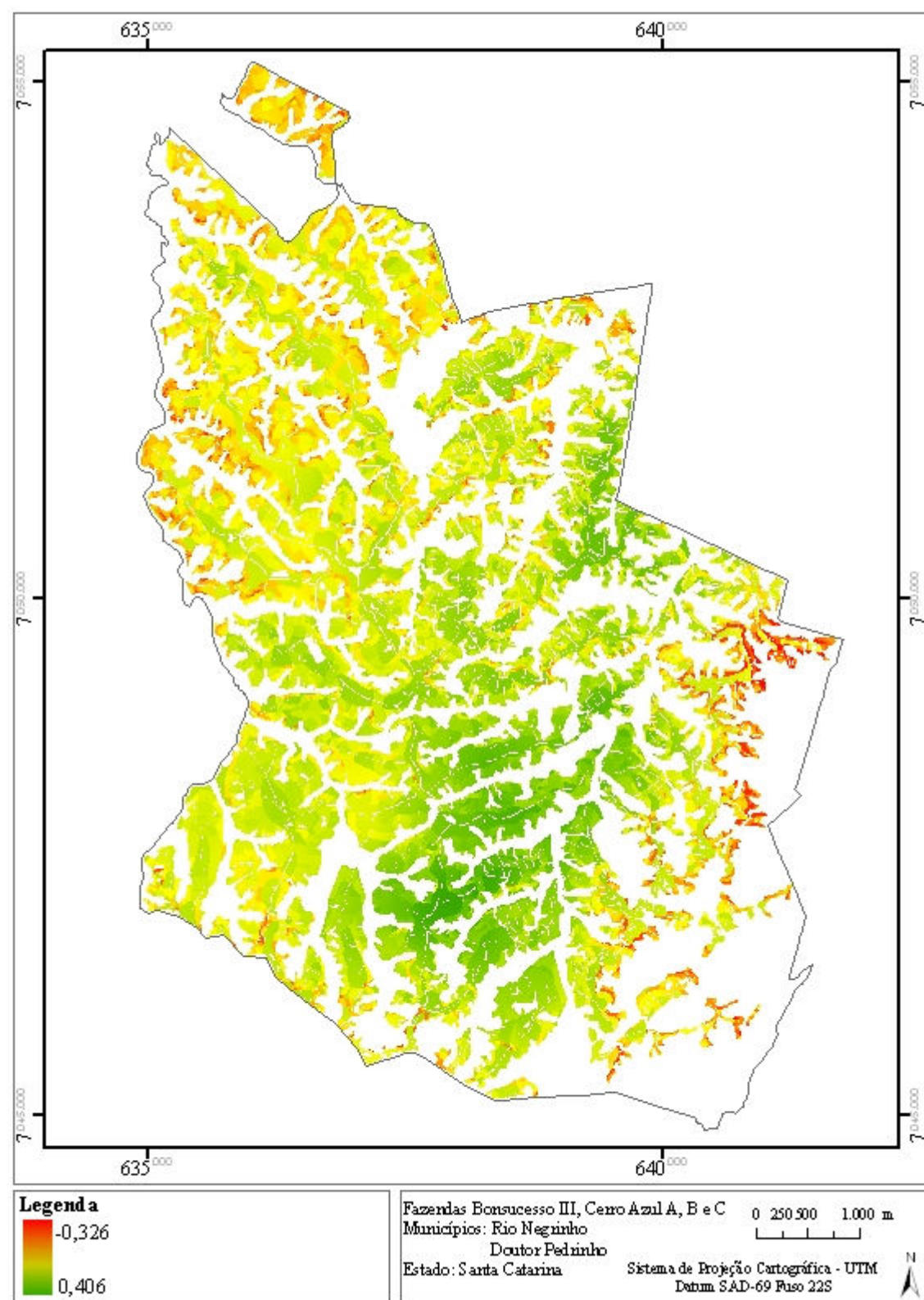
- **Colheita com motosserra e arraste com trator acoplado a cabeçote**

**com cabo de aço:** Neste cenário, correspondente à atividade de impacto igual a 7 em locais com alguma cobertura vegetal, observa-se 99,9% da área de plantio na classe intermediária de fragilidade ambiental, e apenas 0,1% na classe de baixa fragilidade, sendo que as amplitudes de valor “verdade” variaram de -0,326 a 0,400 e de 0,401 a 0,406, respectivamente.

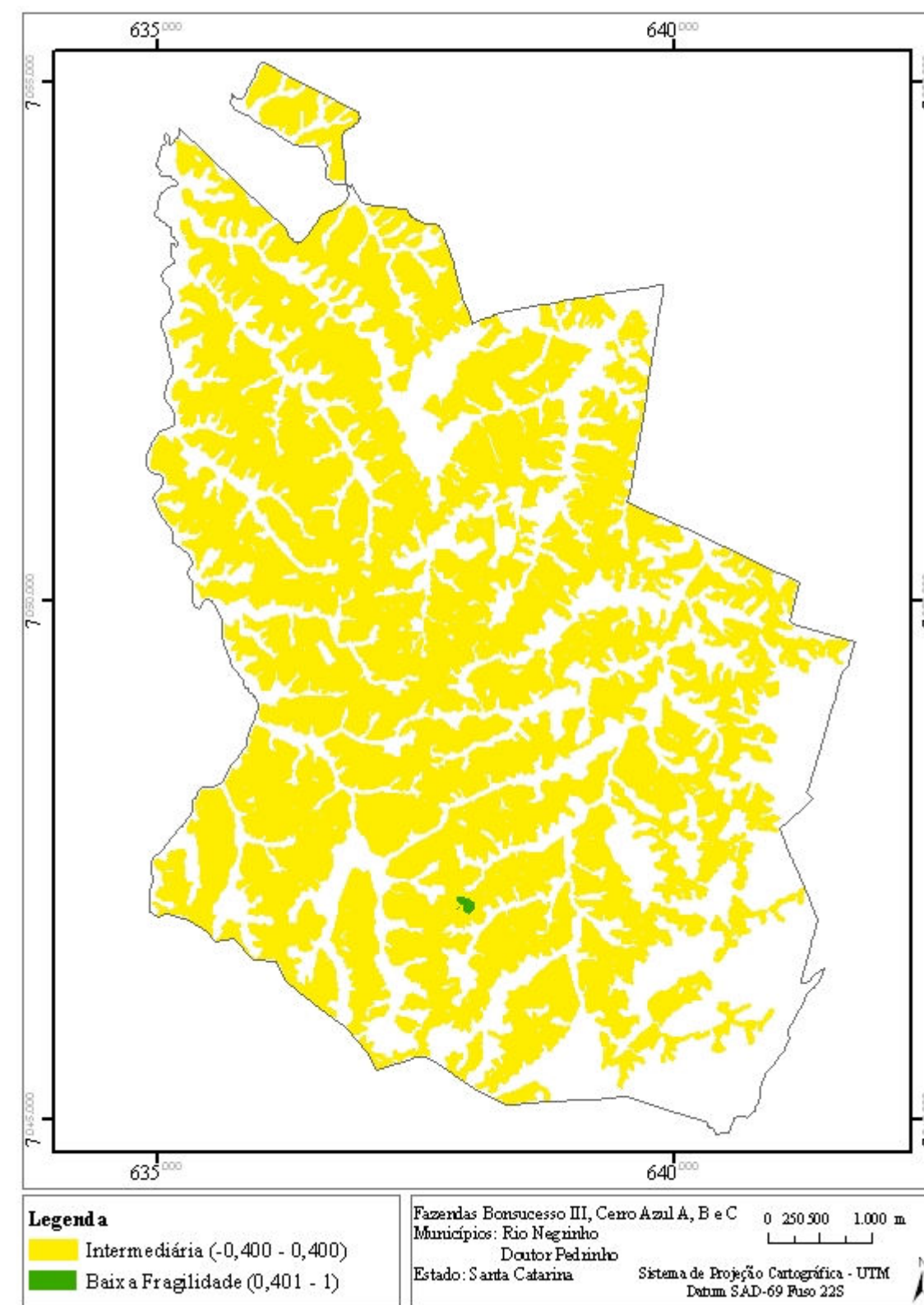
Na classe intermediária de fragilidade ambiental incluem-se todas as áreas com plantio de fragilidade “estado” alta (1,6%), bem como 10,9% da área de plantio com fragilidade “estado” baixa.

Na Figura 18, pode-se observar os mapas referentes à “pressão” desta atividade, onde (a) corresponde a todos os valores “verdade” alcançados e em (b) estão os valores classificados.





(a)



(b)

FIGURA 18 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE COLHEITA COM MOTOSSERA E ARRASTE COM TRATOR ACOPLADO A CABEÇOTE COM CABO DE AÇO E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADO (B)

Os dados da Tabela 16 mostram que para este cenário o impacto causado pela colheita com motosserra faz com que haja um decréscimo para valores maiores ou iguais a -0,100.

TABELA 16 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 7, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL

Ex.	Arg. Superficial (%)	Arg. Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Pressão (valor “verdade”)	Fragilidade (valor “verdade”)
1	19	20	17	58	36,87	-0,724	0,071	-0,326
2	23	25	39	59	24,23	-0,299	0,071	-0,114
3	24	22	41	48	11,31	-0,100	0,071	-0,014
4	30	35	39	86	16,7	0,100	0,071	-0,086
5	30	30	55	57	1,71	0,300	0,071	0,185
6	33	37	49	90	1,72	0,500	0,071	0,286
7	42	46	69	99	1,72	0,740	0,071	0,406

- **Colheita com *feller/skidder*, preparo do solo e marcação mecanizados:** Este cenário representa as atividades de maior impacto deste estudo realizadas dentro das áreas dos talhões.

Na simulação deste cenário toda a área de plantio foi classificada como de fragilidade ambiental intermediária incluindo todas as áreas de fragilidade “estado” alta e baixa. Nos exemplos 1 a 3 (Tabela 17) observa-se que há um acréscimo ainda maior do valor “verdade” dado pela diminuição do valor “verdade” da rede pressão, assim como um decréscimo nos valores “verdade” nos exemplos 4, 5, 6 e 7.

TABELA 17 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 8, E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL

Ex.	Arg. Superficial (%)	Arg. Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Pressão (valor “verdade”)	Fragilidade (valor “verdade”)
1	19	20	17	58	36,87	-0,724	-0,071	-0,398
2	23	25	39	59	24,23	-0,299	-0,071	-0,185
3	24	22	41	48	11,31	-0,100	-0,071	-0,086
4	30	35	39	86	16,7	0,100	-0,071	0,014
5	30	30	55	57	1,71	0,300	-0,071	0,114
6	33	37	49	90	1,72	0,500	-0,071	0,214
7	42	46	69	99	1,72	0,740	-0,071	0,334

Na Figura 19, podem ser visualizados os mapas correspondentes ao impacto de valor 8, sendo (a) todos os valores “verdade” e (b) valores classificados.



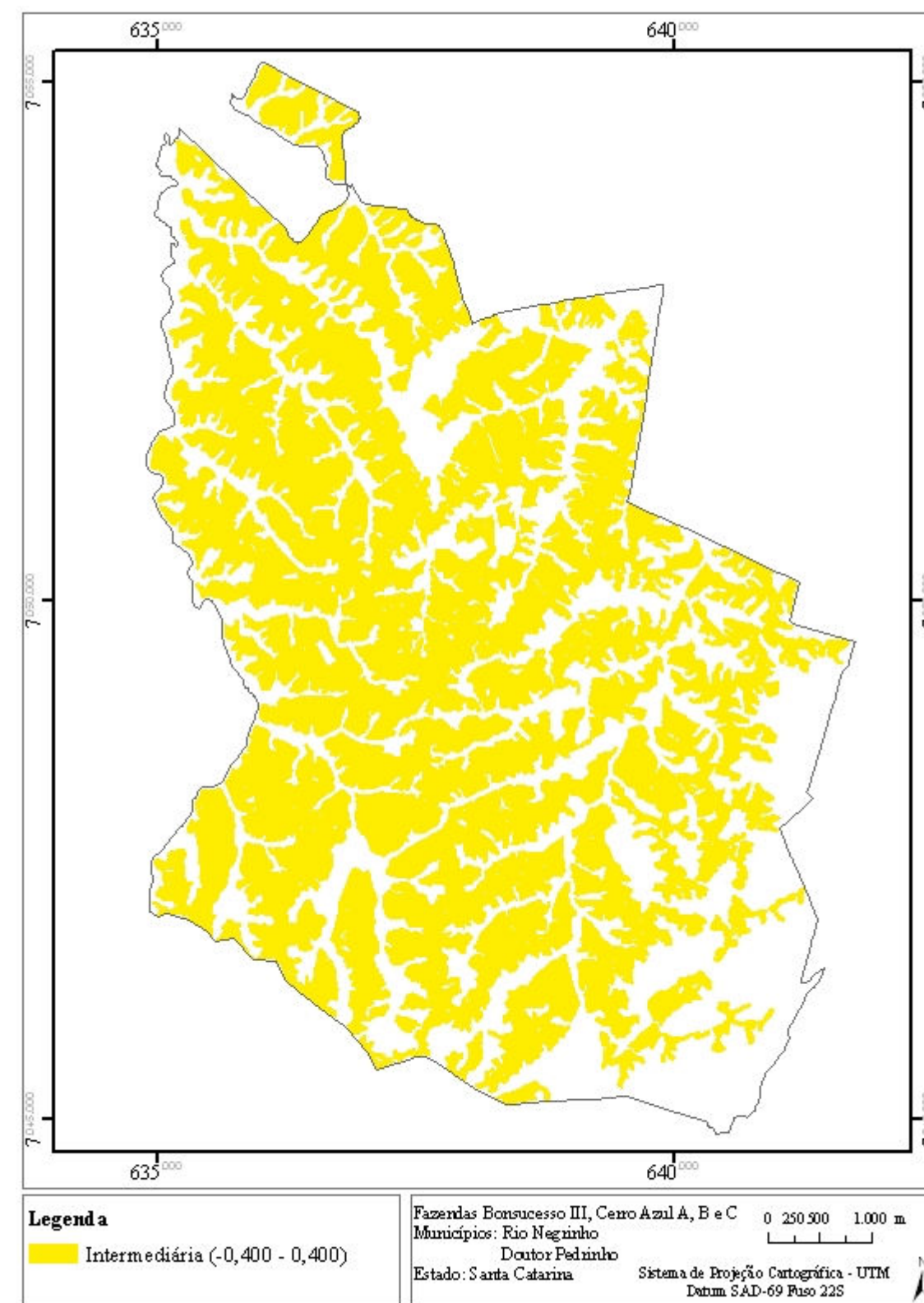
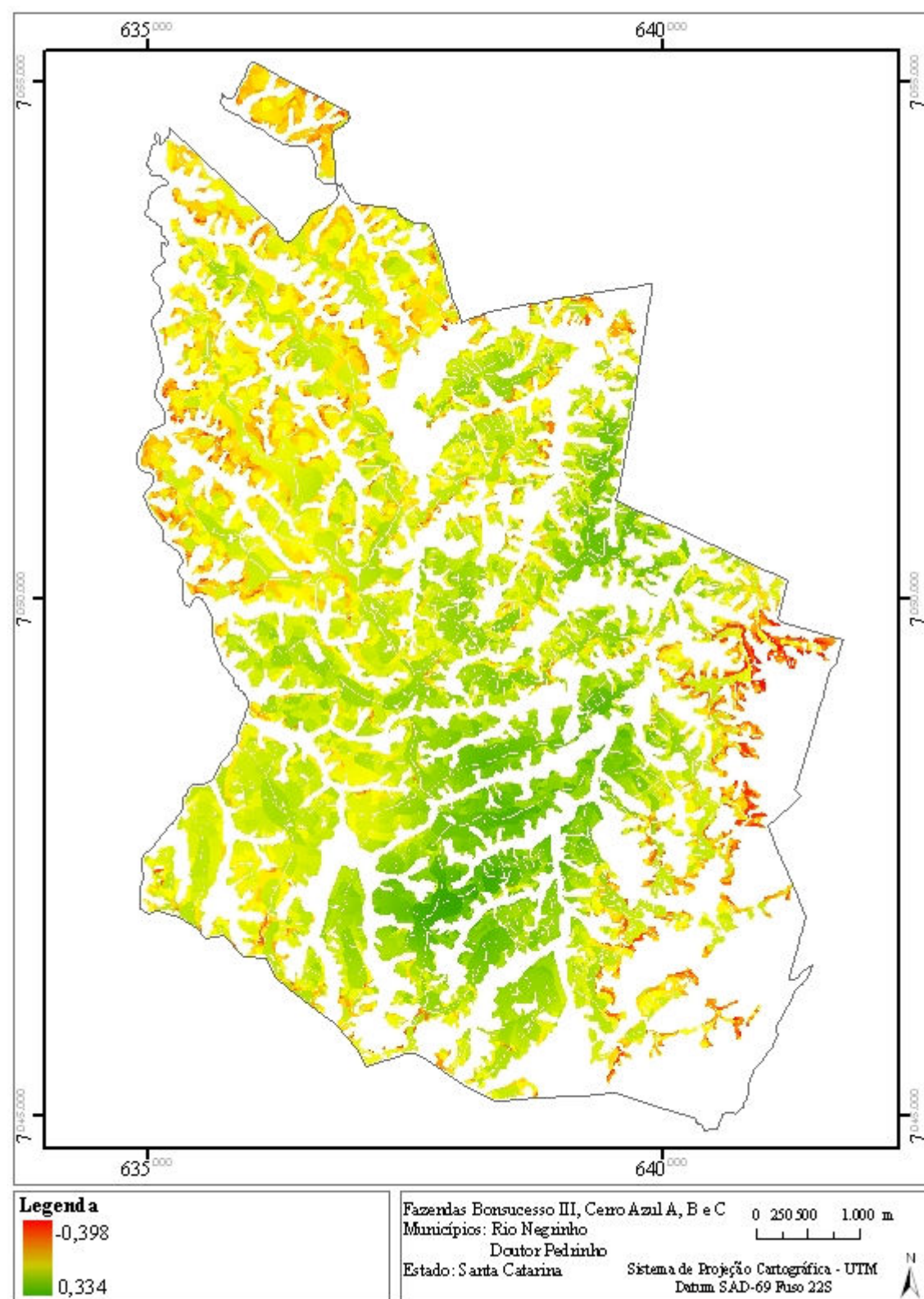


FIGURA 19 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DAS ATIVIDADES DE COLHEITA COM FELLER E ARRASTE COM SKIDDER, PREPARO DO SOLO MECANIZADO, MARCAÇÃO E PLANTIO MECANIZADO E COM ALGUMA COBERTURA VEGETAL, VALORES CONTÍNUOS (A) E CLASSIFICADOS (B)



- **Todos os cenários simultaneamente:** Analisando simultaneamente os cinco cenários com atividades nas áreas de plantio, pode-se afirmar que 78,1% da área de plantio incluem-se na classe de fragilidade intermediária para os cinco cenários (valores de impacto de 4 a 8); 14% apresentaram baixa fragilidade para o cenário com valor de impacto igual a 4; 6,6% para os valores 4 e 5; 1,3% para valores de impacto de 4 a 6 e apenas 0,1% para os cenários com valores de impacto de 4 a 7 (Figura 20).

Na Tabela 18, pode-se observar os exemplos com a classificação de todos os cenários, onde se verifica no exemplo 1 que uma área classificada como de alta fragilidade para a rede “estado” (valor menor que -0,400) classifica-se como de fragilidade intermediária quando inclui-se no modelo a pressão (cobertura vegetal e impacto da atividade florestal). Nos exemplos 2, 3, 4 e 5 as áreas permaneceram classificadas como de fragilidade intermediária. Para o exemplo 6, classificados como de baixa fragilidade (valor “verdade” > 0,400) para a rede “estado”, foi classificado como de fragilidade intermediária para valores de impacto da atividade florestal igual ou acima de 6, já para no exemplo 7 apenas para a atividade de impacto igual a 8 foi classificado como de fragilidade ambiental intermediária.

TABELA 18 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A CLASSIFICAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL DE TODOS OS CENÁRIOS

Ex.	Arg. Super (%)	Arg. Sub (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Cenários (classe - valor “verdade”)				
							8	7	6	5	4
1	19	20	17	58	36,87	A (-0,724)	I (-0,398)	I (-0,326)	I (-0,255)	I (-0,183)	I (-0,112)
2	23	25	39	59	24,23	I (-0,299)	I (-0,185)	I (-0,114)	I (-0,043)	I (0,029)	I (0,100)
3	24	22	41	48	11,31	I (-0,100)	I (-0,086)	I (-0,014)	I (0,057)	I (0,129)	I (0,200)
4	30	35	39	86	16,7	I (0,100)	I (0,014)	I (-0,086)	I (0,157)	I (0,228)	I (0,300)
5	30	30	55	57	1,71	I (0,300)	I (0,114)	I (0,185)	I (0,257)	I (0,328)	I (0,400)
6	33	37	49	90	1,72	B (0,500)	I (0,214)	I (0,286)	I (0,357)	B (0,428)	B (0,500)
7	42	46	69	99	1,72	B (0,740)	I (0,334)	B (0,406)	B (0,477)	B (0,548)	B (0,620)

Legenda: A = classe de alta fragilidade; I = classe intermediária de fragilidade; B = classe de baixa fragilidade

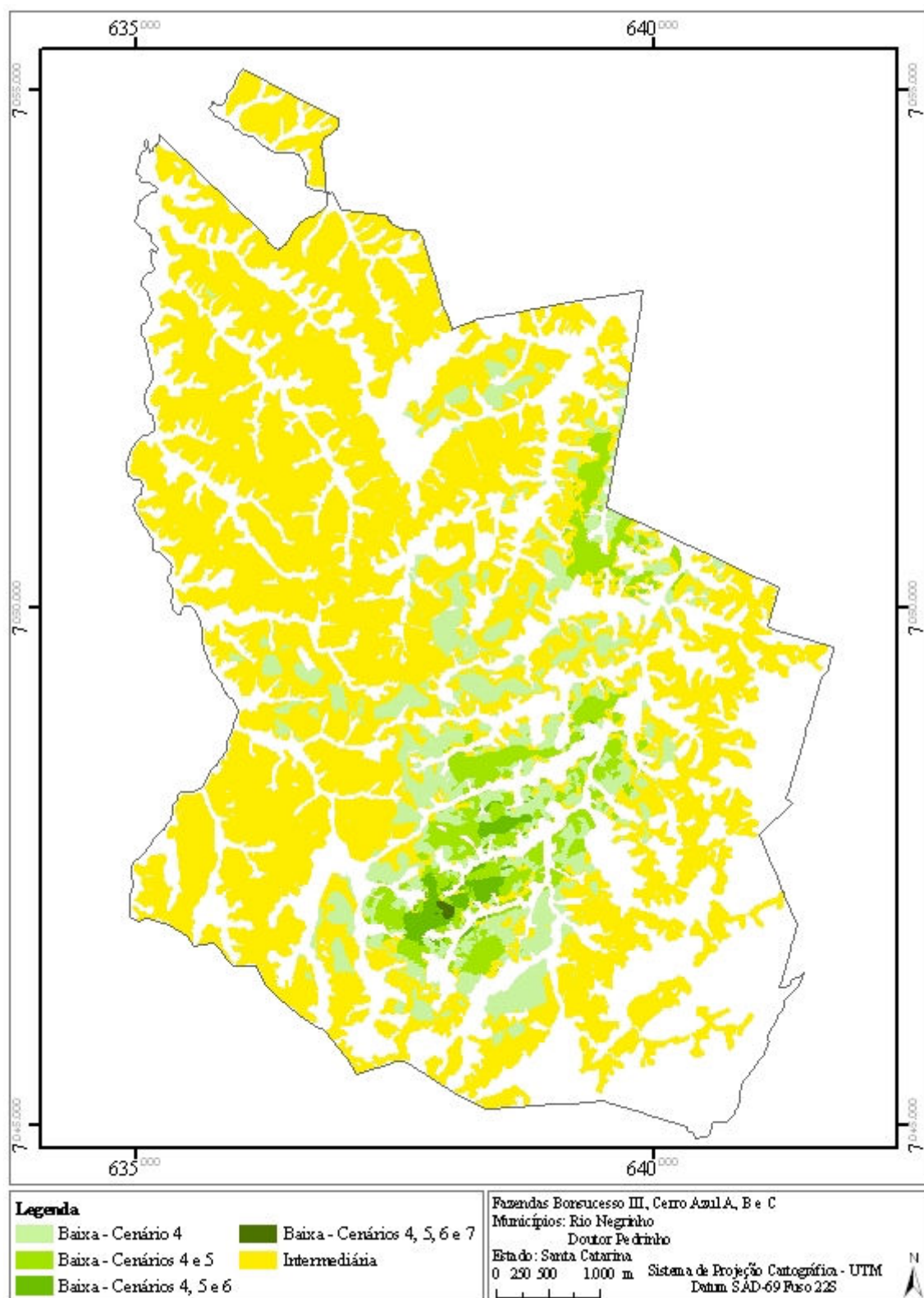


FIGURA 20 - MAPA DE FRAGILIDADE CONSIDERANDO TODOS OS CENÁRIOS SIMULTANEAMENTE

- **Manutenção das estradas:** O último cenário analisado corresponde à

atividade de manutenção nas estradas, onde se considera que não há proteção no solo pela cobertura vegetal. Na simulação deste cenário são encontradas 4,1% (3,7 ha) da área das estradas na classe de alta fragilidade ambiental e o restante 95,9% (87 ha) na classe de fragilidade intermediária, sendo que a amplitude dos valores “verdade” foi de -0,630 a 0,400 e de 0,401 a 0,081, respectivamente.

Na classe de alta fragilidade ambiental verifica-se a ocorrência de 2,4% das áreas das estradas com fragilidade “estado” intermediária, e na classe de fragilidade ambiental intermediária, 13,2% de áreas de fragilidade “estado” baixa, ou seja, houve um decréscimo dos valores “verdade” destas áreas e consequentemente um aumento da fragilidade ambiental proporcionado pelo aumento do valor de impacto e pela ausência da cobertura vegetal.

TABELA 19 – EXEMPLOS DE LOCAIS COM A SIMULAÇÃO DE ATIVIDADES DE IMPACTO 8, SEM COBERTURA VEGETAL

Ex.	Arg. Superficial (%)	Arg. Subsuperficial (%)	Horiz. A (cm)	Prof. Efetiva (cm)	Declive (°)	Estado (valor “verdade”)	Pressão (valor “verdade”)	Fragilidade (valor “verdade”)
1	22	25	29	43	36,87	-0,690	-0,571	-0,630
2	23	26	27	46	24,23	-0,430	-0,571	-0,501
3	26	29	39	63	24,23	-0,231	-0,571	-0,401
4	31	36	52	92	1,72	0,500	-0,571	-0,036
5	41	46	68	100	1,72	0,733	-0,571	0,081

De acordo com os dados mostrados na Tabela 19, é possível verificar também que o valor “verdade” da “pressão” por ser negativo causou menor variação nos valores “verdade” negativos, do que nos valores “verdade” positivos, o que mostra que, apesar de um solo apresentar menor susceptibilidade à degradação, como no exemplo 4 e 5, o fato de não possuir nenhuma proteção vegetal sobre ele, aliado ao valor do impacto garante um aumento na fragilidade ambiental (diminuição dos valores “verdade”). MACHADO *et al.* (2003) citam que no setor florestal, a rede viária é a principal base de toda a atividade florestal, sobretudo no transporte de matéria-prima. No entanto, as estradas florestais têm sido uma das principais causas da erosão e do assoreamento dos cursos d'água nas florestas plantadas, quando não são aplicadas práticas conservacionistas.

O mapa com os valores “verdade” classificados com a pressão referente à atividade de manutenção de estradas pode ser visto na Figura 21.

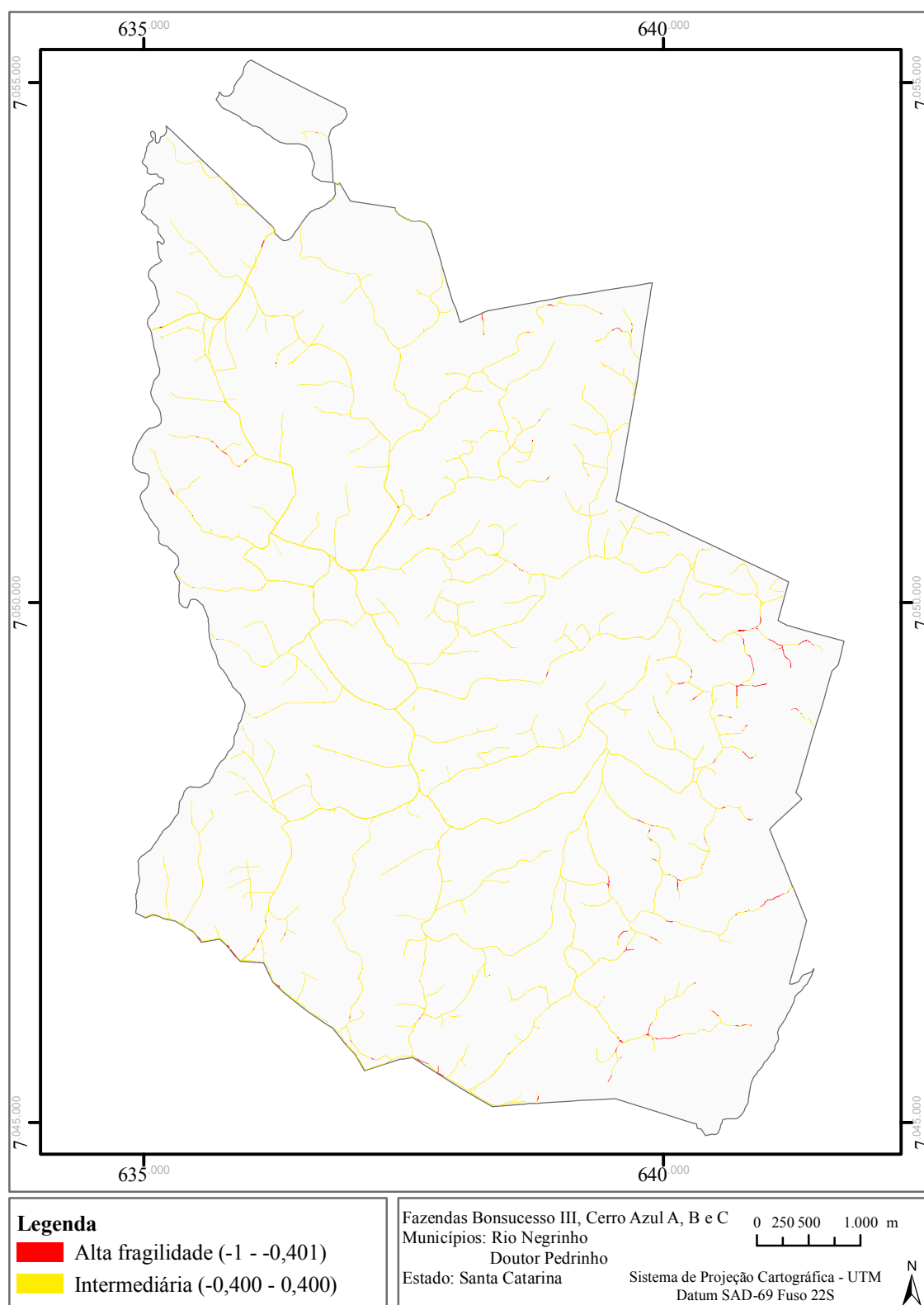


FIGURA 21 - MAPA DE FRAGILIDADE PARA O CENÁRIO DA ATIVIDADE DE MANUTENÇÃO NAS ESTRADAS

#### 5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Alguns dos locais visitados para validação podem ser visualizados na Figura 22.

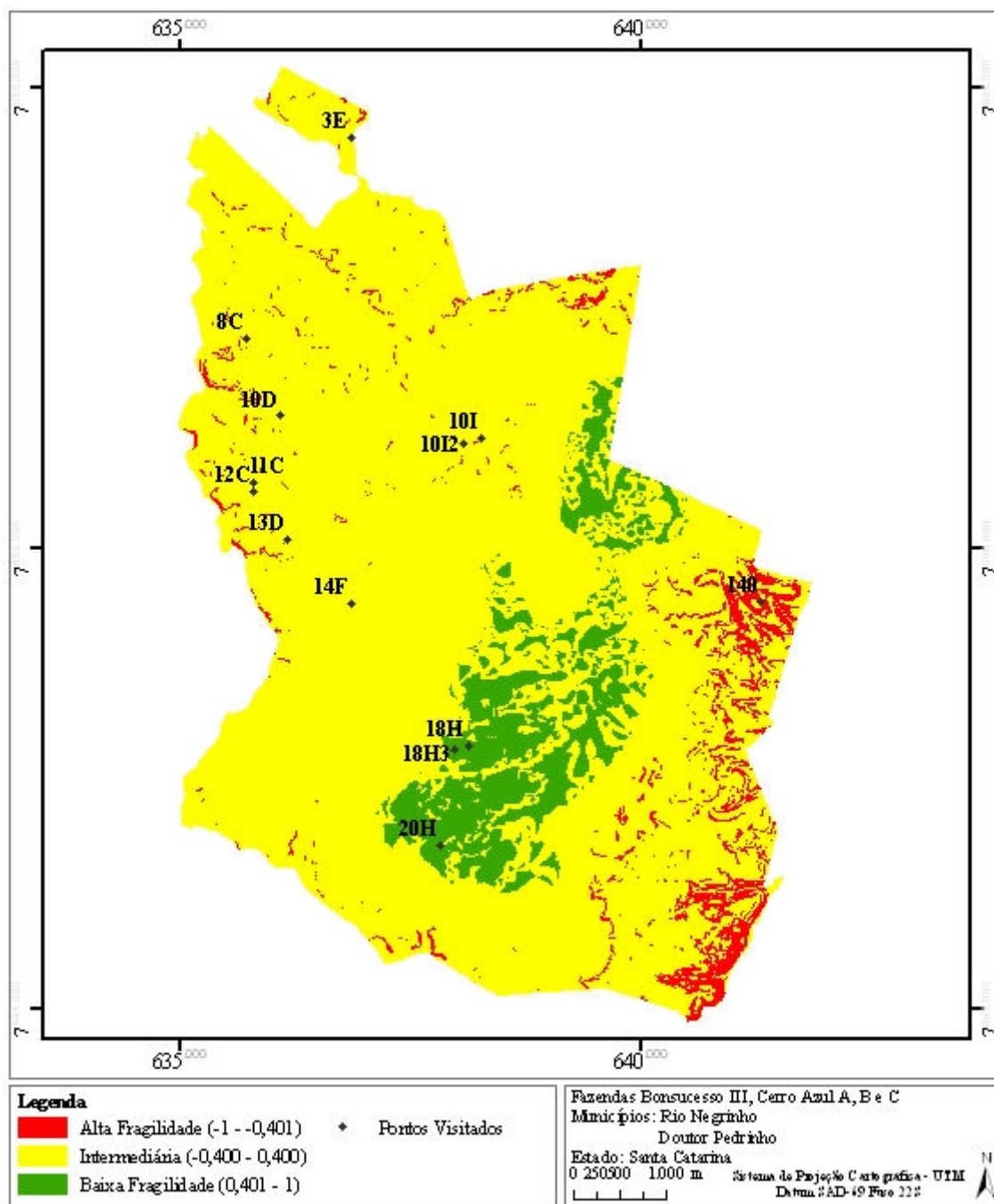


FIGURA 22 – ALGUNS PONTOS VISITADOS NA VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS SOBRE O MAPA DE FRAGILIDADE PARA A REDE “ESTADO”

O ponto denominado “8C” apresenta solo de textura média e relevo suave



ondulado (declive em torno de  $16^\circ$  ou de 20 a 30%). Na avaliação esta área pertence à classe intermediária de fragilidade (-0,400 a 0,400), onde o valor “verdade” observado para a rede “estado” foi de -0,093. No entanto, não foi observada nenhuma degradação por ocorrer cobertura florestal nas áreas com plantio (Figura 23a) e às práticas conservacionistas aplicadas nas margens das estradas, como a instalação de caixas de contenção (Figura 23).

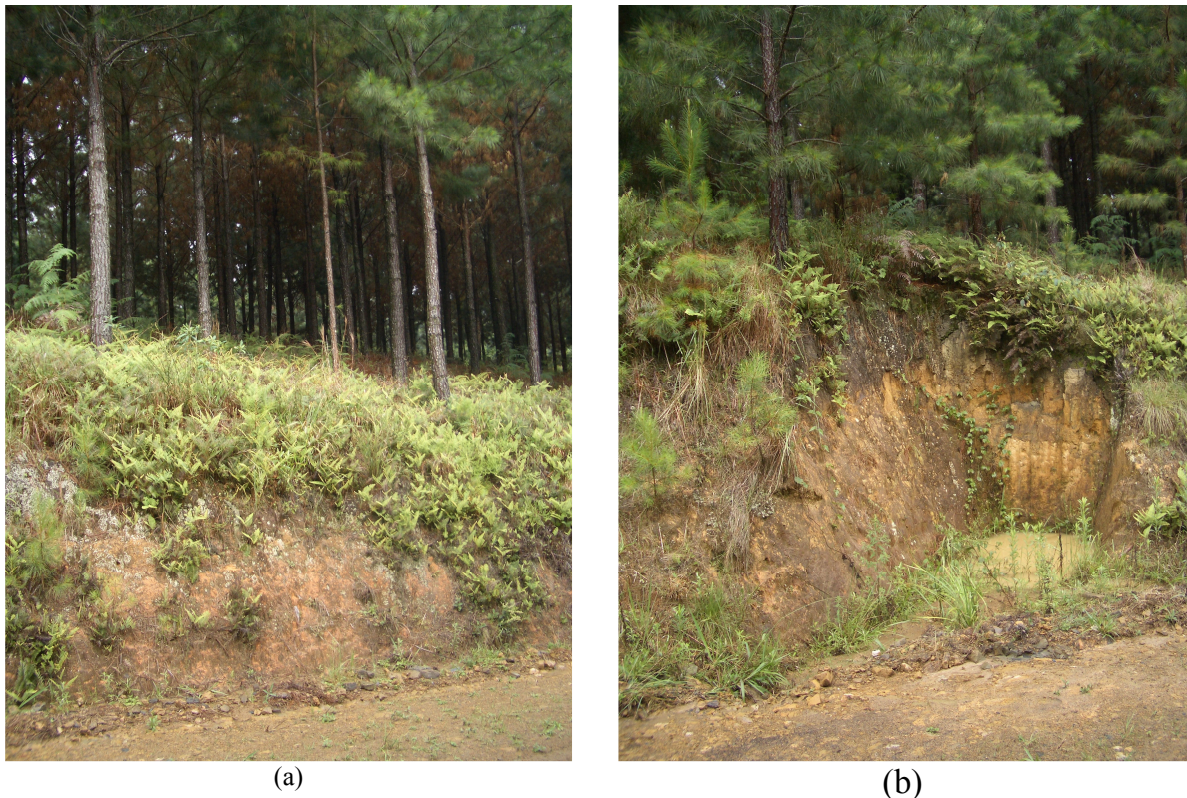


FIGURA 23 – LOCAL INCLUÍDO NA CLASSE INTERMEDIÁRIA DE FRAGILIDADE. ÁREA COM PLANTIO (A) E COM CAIXA DE CONTENÇÃO NAS ESTRADAS (B)

O ponto 10D corresponde a uma área com solos de textura arenosa e relevo com declividade próxima de  $24^\circ$  (30 a 45% de declive). Na avaliação esta área também pertence à classe intermediária de fragilidade para a rede “estado” com valor “verdade” igual a 0,076. Neste local foi encontrado um ponto de erosão (Figura 24) em uma estrada secundária utilizada apenas nas épocas de colheita. Com base nesta observação deve-se destacar a importância das práticas conservacionistas principalmente na atividade de manutenção das estradas.



FIGURA 24 – EROSÃO OBSERVADA NO PONTO 10D VISITADO PARA A VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Os pontos 11C e 12C (Figura 25) apresentam valor “verdade” de 0,220 estando, portanto dentro da classe intermediária de fragilidade, onde se observa um aumento do valor “verdade” em relação aos outros pontos. Isto ocorre porque a área está localizada em relevo plano, apresentando, no entanto, ainda susceptibilidade à erosão por apresentar textura arenosa, justificando a sua inclusão na classe intermediária de fragilidade.



FIGURA 25 – PONTO 12C, INCLUÍDO NA CLASSE INTERMEDIÁRIA DE FRAGILIDADE



O ponto 13D apresenta valor “verdade” de -0,503 para a rede “estado”, enquadrando-se na classe de alta fragilidade, pois a declividade para este ponto está acima de  $36,86^\circ$ . Já o ponto 14F apresenta valor “verdade” de 0,335, pertencendo a classe intermediária de fragilidade. Neste local verificou-se que apesar de o relevo ser plano, apresenta textura média, justificando o seu grau de fragilidade.

Os pontos 18H, 18H3 (Figura 26) e 20H referem-se a locais onde são atingidos os maiores valores “verdade”, pois são solos que além de apresentar textura argilosa estão localizados em áreas de relevo plano ( $1,72^\circ$  ou até 3% de declive). Nestes pontos, os valores “verdade” atingidos foram 0,497; 0,479 de 0,590, respectivamente, representando locais de baixa fragilidade. Na Figura 26 pode-se observar também o bom estado de conservação em que se encontram.



FIGURA 26 – LOCAL INCLUÍDO NA CLASSE DE B FRAGILIDADE

Os pontos 10I e 10I2 apresentam valor “verdade” de -0,073 e 0,191 respectivamente, pertencentes à classe intermediária de fragilidade. Para ambos verificou-se que os solos apresentam textura média, no entanto o ponto 10I2 apresenta relevo plano, fazendo com que o seu valor “verdade” seja maior.

O ponto 3E refere-se também a uma área com solo arenoso, raso e com declive em torno de  $11^\circ$  (até 20%). O valor “verdade” encontrado para esta área é



de -0,111, sendo inferior apenas ao ponto 13D que apresenta um maior declive. Esta área também se enquadra na classe intermediária de fragilidade, onde pode ser observado que pela falta de cobertura vegetal (Figura 27a) há risco de degradação, apoiado, ainda, pela presença de afloramentos rochosos (Figura 27b).

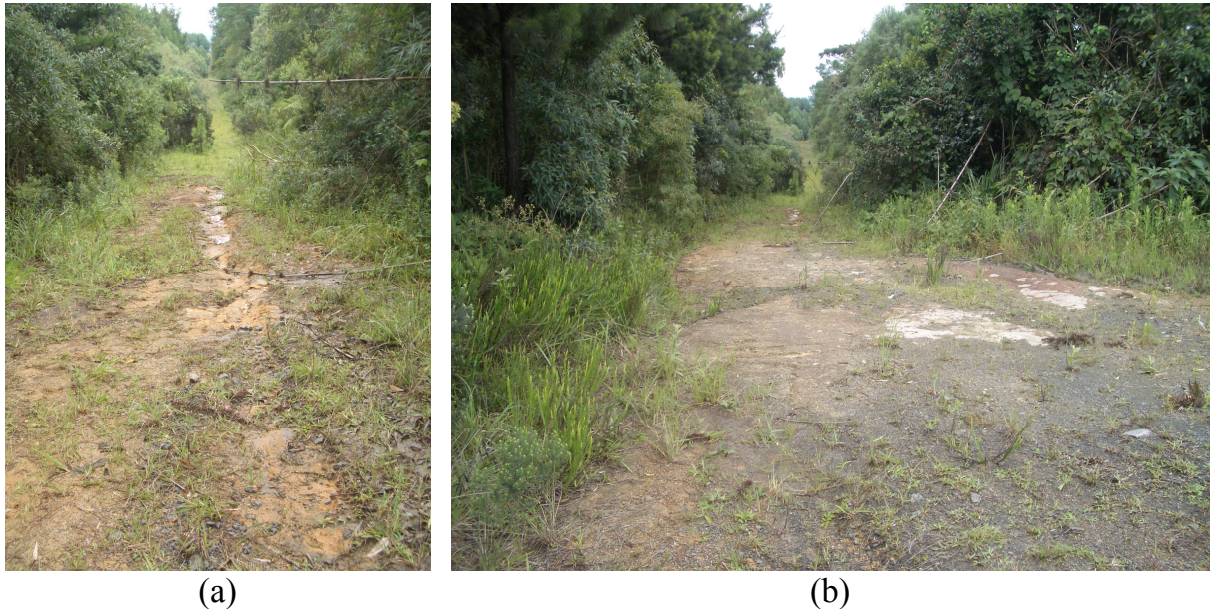


FIGURA 27 – ÁREA COM SOLO ARENOSO E AFLORAMENTO ROCHOSO CLASSIFICADA COM FRAGILIDADE INTERMEDIÁRIA

O ponto 14O refere-se a uma área que além de apresentar textura média, localiza-se em relevo com declividade acima de  $36^\circ$ , apresentando, portanto valor “verdade” de -0,695 e pertencente à classe de alta fragilidade, sendo um dos pontos mais críticos do mapa.

De um modo geral, verificou-se que os pontos observados na validação estão coerentes com a classificação *fuzzy*, com a divisão em sete classes de fragilidade assim como com a divisão em três classes (alta, intermediária e baixa) definidas no item 5.3.1.

Através desta validação foi possível constatar que na classe de alta fragilidade estão representadas as áreas onde há realmente maior risco de degradação, sobretudo devido ao fator declividade, devendo ser destinadas para áreas de reserva legal, por exemplo. Já para as áreas pertencentes à classe intermediária de fragilidade,

verificou-se que apesar de haver diferenças significativas entre os valores “verdade”, estas podem ser tratadas de forma semelhante, pois por haver risco de degradação nestas áreas, as aplicações de práticas conservacionistas não devem deixar de ser aplicadas. Para as áreas pertencentes à classe de baixa fragilidade, pode-se verificar que o seu “estado” é mais estável e menos susceptível à degradação, pois são áreas onde há o predomínio de relevo plano, solos profundos e de textura argilosa.

## 6 CONCLUSÕES

- a) A utilização de redes de dependência, aliadas a lógica *fuzzy*, permitem uma análise compartimentada e detalhada da fragilidade ambiental, além de se mostrarem apropriadas para a realização de tal análise;
- b) Os limites utilizados para a definição do domínio da função de pertinência *fuzzy* de todas as variáveis são adequados para representar a fragilidade ambiental, corroborados pela validação no campo;
- c) O mapa de fragilidade ambiental serve de apoio à tomada de decisão para a seleção das técnicas de manejo, assim como, quais práticas conservacionistas devem ser adotadas;
- d) A atividade de manutenção de estradas, com valor de impacto igual a 8, requer cuidados adicionais de práticas de conservação, principalmente se realizada em áreas pertencentes à classe de alta fragilidade;
- e) A classe de baixa fragilidade também requer atenção, sendo que nestas áreas há um risco menor de degradação se for realizada uma atividade mais impactante, quando comparada às classes de fragilidade alta e intermediária;
- f) Todas as áreas consideradas de fragilidade alta no mapa da rede “estado” foram classificadas como de fragilidade ambiental intermediária, por ter sido considerada a variável cobertura vegetal;
- g) A fragilidade ambiental aumenta à medida que os valores de impacto das atividades florestais também aumentam, sendo menor para a atividade de manutenção manual e maior para a manutenção das estradas.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação desta técnica em outras áreas de estudo e até mesmo com diferentes atividades da área florestal, bem como com outros indicadores ambientais, principalmente aqueles utilizados para a certificação florestal.

Em novas pesquisas recomenda-se também que as outras variáveis/indicadores ambientais incorporados no estudo devam estar bem definidas, assim como os valores dos domínios da função de pertinência *fuzzy* e eventualmente os pesos adotados, pois muitas variáveis/indicadores não apresentam valores padronizados como se conhece em outras áreas, tais como parâmetros de análise da qualidade do ar ou água, ou ainda não apresentam nenhum estudo a respeito.

Este estudo também pode ser aprimorado com a implementação de outro componente incluído no EMDS, o *Priority Analyst* que avalia os dados através de um modelo de decisão construído com o *Criterion DecisionPlus* (CDP, *InfoHarvest, Inc.*), que utiliza as técnicas: AHP (Processo Analítico Hierárquico) e a *SMART* (*Simple Multi-attribute Rating Technique*) para auxiliar, por exemplo, na definição das áreas nas quais determinadas atividades podem ser realizadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALHO, J. M.; KANGAS, J. Analyzing uncertainties in experts opinions of forest plan performance. **Forest Science**, Bethesda, v. 43, n. 4, p. 521-528, 1997.

BATTISTELLA FLORESTAL. **Plano de Gestão de Impactos Ambientais**. Rio Negrinho, SC, 2003. Documento interno não publicado.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, SP : Livro ceres, 1985.

BOGNOLA, I. A. **Unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no Planalto Norte Catarinense, com base em características do meio físico**. Curitiba, 2007. 160 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná.

BOIKO, J. D. **Mapeamento geomorfológico e fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Curralinho – Região Metropolitana de Curitiba-PR**. Curitiba, 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia - Gestão e Análise Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

BOLFE, E.L.; GOMES, J.B.V.; FONTES, H.R. Variabilidade espacial de atributos do solo como subsídio para produção integrada de frutas em perímetro irrigado no nordeste do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/biblioteca/>> Acesso em: 10/05/2007.

BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Kidlington: Pergamon, 1994.

BOURGERON, P. S., HUMPHRIES, H. C., REYNOLDS, K.M. Conducting Large-Scale Conservation Evaluation and Conservation Area Selection Using a Knowledge-based System. In: International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects, and Research Needs, 4., 2000, Banff, Alberta, Canadá. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.colorado.edu/research/cires/banff/pubpapers/87/>> Acesso em: 21/05/2007.

BOX, G. E. P; COX, D. R. An analysis of transformations (with Discussion). *Journal of the Royal Statistical Society, Series B.* v.26, p. 211-252. 1964.

BOYLAND, M.; NELSON, J.; BUNNELL, F.L.; D'EON, R.G. An application of fuzzy set theory for seral-class constraints in forest planning models. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 223, n. 1-3, p. 395–402, 2006.

BRITO, L.F. **Erosão hídrica de um Latossolo Vermelho distrófico típico em áreas de pós-plantio de eucalipto na região de Guanhães (MG)**. Lavras, 2004. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Lavras.

BUENO, M.C.D. **Utilização de redes de dependência e lógica nebulosa em estudos de avaliação ambiental**. Rio de Janeiro, 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação – Geomática), Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. The semi-variogram and punctual kriging. **European Journal Soil Science**, Harpender, v.31, n.2, p.315-31, 1980.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. New York: Oxford University Press, 1986.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL R. A. **Principles of Geographic Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

CÂMARA, G; MONTEIRO, A.V.M.; DRUCK, S.; CARVALHO, M.S. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M.(Ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigeagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring)**. São José dos Campos, 1997. 116 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

CAMARGO, C. M. S. **Compactação do solo causada pela colheita de *Pinus taeda*, pelo sistema fuste (tree length)**. Curitiba, 1999. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Silvicultura e Manejo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, 2002.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A.. Soil and water losses by rainfall erosion influenced by tillage methods, slope-steepness classes, and soil fertility levels. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, 2003. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832003000400019&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000400019&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 28/11/2007. doi: 10.1590/S0100-06832003000400019

DAVIS, J. G.; HOSSNER, L. R.; WILDING, L. P.; MANU, A. Variability of soil chemical properties in two sandy dunal soils of Niger. **Soil Science**, Philadelphia, v.159, p. 321-30, 1995.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L.. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 3, 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622005000300005&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000300005&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 06/11/2007

DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. Model-based geostatistics. In: Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística, 14., 2000, Caxambu. **Resumos**.....192p.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Atlas Geo**. Descrições geomorfológicas do Estado de Santa Catarina, 1986.

DONHA, A. G. **Avaliação do uso de técnicas de suporte à decisão na determinação da fragilidade em ambiente de geoprocessamento: o caso do Centro de Estações Experimentais do Canguiri – Universidade Federal do Paraná**. Curitiba, 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ELLS, A.; BULTE, E.; Van KOOTEN, C. Uncertainty and forest land use allocation in British Columbia: Vague Priorities and Imprecise Coefficients. **Forest Science**, Bethesda, v.43, n. 4, p. 509-520, 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA-SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 2006. 2ª ed.rev. 306p.

FALCÃO, A. O.; PRÓSPERO, M. S.; BORGES, J. G. A real-time visualization tool for forest ecosystem management decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.53, n.1, p. 3-12, 2006.

FAVARETTO, N.; COGO, N. P.; BERTOL, O.J. Degradação do solo por erosão e compactação. In: LIMA, M.R (Ed.). **Diagnóstico e recomendações de manejo de solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006a.

FAVARETTO, N.; COGO, N. P.; BERTOL, O.J. Uso, manejo e conservação do solo e água: aspectos agrícolas e ambientais. In: LIMA, M.R (Ed.). **Diagnóstico e recomendações de manejo de solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006b.

FENNER, P. Relações entre o tráfego de veículos e as deformações físicas dos solos florestais. In: **IX Seminário de atualização sobre sistemas de colheita de madeira e transporte florestal**. Curitiba. 1996.

FIGUEIREDO, G. C.; BRAGA, A. L.; ELOI, F. H.; CARVALHO, A. S.; CALIJURI, M. L. Caracterização da fragilidade ambiental utilizando sistemas de informações geográficas. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Multifinalitário, 7., Florianópolis, 2006. **Anais...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

FLORIANI, N. **Avaliação da fragilidade geossistêmica de uma microbacia sobre geologia cárstica: potencial e limitações**. Curitiba, 2003. 147 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciências do Solo), - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

GHEZZI, A. O. **Avaliação e mapeamento da fragilidade ambiental da bacia do rio Xaxim, baía de Antonina – PR, com o auxílio de geoprocessamento**. Curitiba, 2003. 57 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciências do Solo), - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

GIBOSHI, M.L.; RODRIGUES, L.H.A.; LOMBARDI NETO, F. Sistema de suporte à decisão para recomendação de uso e manejo da terra. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 10, n.4, p.861-866, 2006.

GONÇALVES, J.L. de M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/capa.htm>> Acesso em: 21/03/2006.

KIRDA, C.; HARDARSON, G.; ZAPATA, F. Spatial variability of root zone soil water status and of fertilizer uptake by forage crops. **Soil Technology**, Amsterdam, v.1, n.3, p. 223-34, 1988.

LEOPOLD, L.B.; CLARKE, F.S.; HANSHAW, B. et al. **A procedure for evaluating environmental impact**. Washington: U. S. Geological Survey, 1971. 13p. (circular 645)

LEPSCH, I. F. (Coord). **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.

LEXER, M.J.; HÖNNINGER, K.; VACIK, H. Modelling the effect of forest site conditions on the ecophysiological suitability of tree species: an approach based on fuzzy set theory. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 27, n. 1-3, p. 393-399, 2000.

LOURENÇO, R.S.; MEDRADO, M.J.S. Cobertura morta na produção da erva-mate. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1998. 15p. (EMBRAPA-CNPQ. **Circular Técnica**, 30).

MACHADO, C. C. et al . Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. **Revista Árvore** , Viçosa, v. 27, n. 3, 2003 .Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-67622003000300004&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622003000300004&lng=pt&nrm=iso)>. Acesso em: 08/11/2007.

MACHADO, R.V.; BECEGATO, V.A.; NETO, S.L.R.; FIGUEIREDO, O.A.R. Variabilidade espacial de algumas propriedades físicas em três solos para duas profundidades. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.5, n.1, p.44-52, 2006.

MANZIONE, R.L. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em Araguari-MG**. Botucatu, 2002. 136 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia da Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho.

MARTINS, S.G.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; MARQUES, J.J.G.S.M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.3, p.395-403, 2003.

MARTINS, S.G. **Erosão hídrica em povoamento de eucalipto sobre solos coesos nos Tabuleiros Costeiros, ES**. Lavras, 2005. 106 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Lavras.

MEIRELLES, M.S.P. **Análise integrada do ambiente através do geoprocessamento: uma proposta metodológica para a elaboração de zoneamentos**. Rio de Janeiro, 1997. 192 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MEIRELLES, M. S. P.; BUENO, M. C. D. ; COUTINHO, H. L. C. DIAS, T. C. S. Sistema de suporte a decisão para avaliação do risco de impactos ambientais em bacias hidrográficas por redes de dependência e lógica fuzzy In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/capa.htm>> Acesso em: 21/03/2006.

MELLO, J.M. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. Piracicaba, 2004. 110 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais), Setor de Ciências Agrárias, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MÉLLO JR, A. V.; PORTO, R. L. L.; LISBOA NETO, H.; SCHARDONG, A.4; ROBERTO, A. N.; MARC ELLINI, S. S.; OLIVEIRA, C. P. M. Uso de ferramentas SIG em sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. In: Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, 3., 2006, Aracaju. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr3/>> Acesso em: 25/05/2007.



MILLER, B.J.; SAUNDERS, M.C. **NetWeaver Reference Manual**. Penn State University e The Heron Group LLC. 2002. 126p.

MOREIRA, F.R.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. **Técnicas de suporte a decisão para modelagem geográfica por álgebra de mapas**. São José dos Campos: INPE, 2001. 121p. Relatório Técnico.

MOWRER, H.T. **Decision support systems for ecosystem management: an evaluation of existing systems**. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO, 1997. General Technical Report RM-GTR-296.

OCDE. **Draft Synthesis Report, Group on State of the Environment Workshops on Indicators for Use in Environmental Performance Reviews**. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development, 1993.

PAZ-GONZALEZ, A.; TABOADA CASTRO, M. T.; VIEIRA, S. R. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 81, p. 469-479, 2001.

PIRES, L.S. **Sistemas de manejo de eucalipto e erosão hídrica em Latossolo Vermelho-Amarelo muito argiloso na região de Belo Oriente (MG)**. Lavras, 2004. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Lavras.

RAUSCHER, H.M. Ecosystem management decision support for federal forests of the United States: a review. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v.114, n. 2-3, p. 173–197, 1999.

RAY, D., REYNOLDS, K., SLADE, J., HODGE, S. A Spatial Solution to Ecological Site Classification for British Forestry Using Ecosystem Management Decision Support. In: International Conference on GeoComputation, 3., 1998, Bristol. **Proceedings...** Disponível em: < <http://www.geocomputation.org/1998/index.html> > Acesso em: 10/06/2007.

REYNOLDS, K. M. **EMDS Users Guide (version 2.0): Knowledge-Based Decision Support for Ecological Assessment**. Portland, OR., 1999, 63 p. General Technical. Report PNW-GTR-470.

REYNOLDS, K.M., JENSEN, M., ANDREASEN, J., GOODMAN, I. Knowledge-based Assessment of Watershed Condition. In: IUFRO Conference: Application of Scientific Knowledge to Decision Making in Managing Forest Ecosystems, 1999b, Asheville. **Proceedings...** 1999. p. 3–7.

REYNOLDS, K., JENSEN, M., ANDREASEN, J., GOODMAN, I. Knowledge-based assessment of watershed condition. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.27, n. 1-3, p. 315–333. 2000.

REYNOLDS, K.M. *EMDS*: Using a logic framework to assess forest ecosystem sustainability. **Journal of Forestry**, Bethesda, v. 99, n.6, p. 26–30. 2001.

REYNOLDS, K.M., RODRIGUEZ, S., BEVANS, K. **User Guide for the Ecosystem Management Decision Support System, Version 3.0**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2003a.

REYNOLDS, K.M., JOHNSON, K.N., GORDON, S.N. The science policy interface in logic-based evaluation of forest ecosystem sustainability. **Forest Policy Economics**, Amsterdam, v. 5, n.4, p. 433-446, 2003b.

REYNOLDS, K. Integrated decision support for sustainable forest management in the United States: fact or fiction? **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.49, n.1, p. 6-23, 2005.

RIBEIRO JUNIOR, P. J. **Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo**. Piracicaba, 1995. 99 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. geoR: a package for geostatistical analysis. **RNEWS**, v.1, n.2, p.15-18, 2001.

RODRIGUES, S.C. Análise da fragilidade do relevo: abordagem empírico-experimental. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v.12, n. 23, p. 167-189, 2000.

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63-73, 1994.

RUFINO, T.M.C.; THIERSCH, C.R.; FERREIRA, S.O.; KANEGAE JUNIOR, H.; FAIS, D. Uso da geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus sp.* e atributos do solo. **Revista Ambientia**, Guarapuava, v. 2, ed, especial 1, p. 83-93, 2006.

RUHOFF, A.L.; PENA E SOUZA, B.S.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R.S. Lógica *fuzzy* e zoneamento ambiental da bacia do Arroio Grande. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2005/02.12.16.31/doc/capa.htm>> Acesso em: 21/03/2006.

SANTOS, E. **Mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia do Rio Jirau, Município de Dois Vizinhos – Paraná**. Curitiba, 2005. 127 f. Dissertação (Mestrado Geografia - Gestão e Análise Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade federal do Paraná.

SAWYER, B.; FOSTER, D.L. **Programming expert systems in Pascal**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 186p.

SHOUSE, P. J.; RUSSELL, W. B.; BURDEN, D. S.; SELIM, L. B.; VAN GENUCHTEN, M. T. Spatial variability of soil water retention functions in a silt loam soil. **Soil Science**, Philadelphia, v.159, p.1-12, 1995.

SILVA, M. C. B. **Avaliação da fragilidade ambiental da bacia do Rio Nhundiaquara – PR**. Curitiba, 2001. 207 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciências do Solo), - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

SILVA, S.F. **Zoneamento Geoambiental com auxílio de lógica *fuzzy* e proposta de um geoindicador para caracterização do meio físico da Bacia do Rio do Peixe**. São Carlos, 2005. 414 f. Tese (Doutorado em Geotecnia), - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SPÖRL, C. **Análise da Fragilidade Ambiental Relevo-Solo com Aplicação de Três Modelos Alternativos nas Altas Bacias do Rio Jaguari-Mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata**. São Paulo, 2001. 159 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Setor de Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

STIRN, L.Z. Integrating the fuzzy analytic hierarchy process with dynamic programming approach for determining the optimal forest management decisions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 94, n. 2-3, p. 296-305, 2006.

STOMS, D. M.; McDONALD, J. M.; DAVIS, F. W. Environmental assessment: Fuzzy Assessment of Land Suitability for Scientific Research Reserves. **Environmental Management**, New York, v. 29, n. 4, p. 545-558, 2002.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE, 1977.

TROEH, F.R. HOBBS, J.A.; DONAHUE, R.L. **Soil and water conservation**: productivity and environmental protection. 3<sup>a</sup> ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

VAN ES, H. M.; VAN ES, C. L. Spatial nature of randomization and its effect on the outcome of field experiments. **Agronomy Journal**, Madison, v.85, p.420-428, 1993.

VIEIRA, S. R.; CASTRO, O. M.; TOPP, G. C. Spatial variability of some soil physical properties in tree soils of São Paulo, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, p. 333-341, 1992.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2000. p.1-54.

WATERMAN, D.A. **A guide to expert systems**. Reading, MA: Addison-Wesley Publishers. 1986.

WORRELL, R.; HAMPSON A. The influence of some forest operations on the sustainable management of forests soils - a review. **Forestry**, Oxford, v. 70, n. 1, p. 61-85, 1997.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and control**, United Kingdom, v. 8, n.3, p.338-353, 1965.